

Abril 2020 • N.º 523 • 6,90 € • investigacionyciencia.es

Edición española de SCIENTIFIC AMERICAN

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

EL NUEVO CORONAVIRUS | EL MAPA SOCIAL DEL CEREBRO | LA PRIMERA MOLÉCULA DEL UNIVERSO

ABRIL 2020 N.º 523

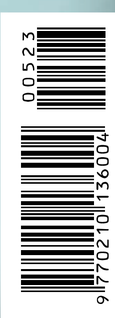
EL NUEVO CORONAVIRUS

La búsqueda contrarreloj de vacunas y tratamientos

NEUROCIENCIA
Los circuitos cerebrales que guían nuestras relaciones sociales

ASTROQUÍMICA
La primera molécula del universo

SOSTENIBILIDAD
El hidrógeno, pieza clave en la transición energética

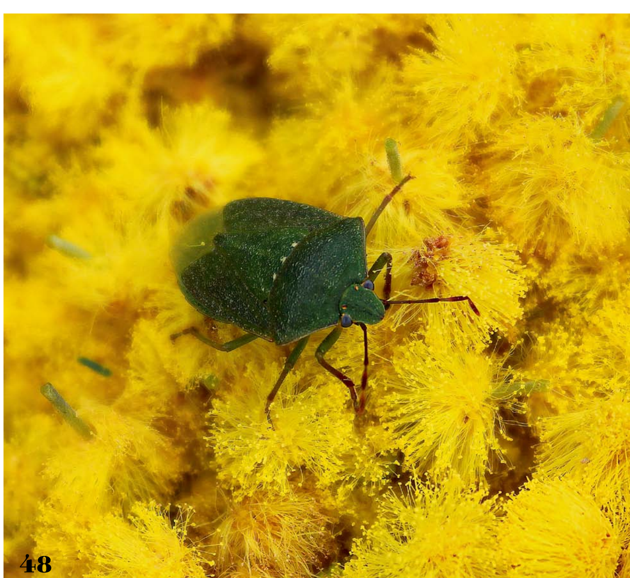




ARTÍCULOS

TIM FLACH


4


48


53

INVESTIGACIÓN Y
CIENCIA

SECCIONES

EN PORTADA



La actual pandemia de coronavirus nos ha llevado a vivir una situación excepcional en la que buscamos información rápida y veraz. Pero en ciencia, la velocidad muchas veces está reñida con la certidumbre. Los cientos de estudios que se han publicado sobre el virus, la mayoría pendientes de revisión externa, han identificado moléculas y mecanismos de infección que están señalando el camino en la búsqueda de vacunas y tratamientos. GettyImages/Rost-9D/iStock.

redaccion@investigacionyciencia.es



Enero 2020

DESIGUALDAD ECONÓMICA

En «¿Es inevitable la desigualdad?» [Investigación y Ciencia, enero de 2020], Bruce Boghosian propone un juego que parece demostrar que la concentración de riqueza es inevitable. Por mi parte, planteo el siguiente análisis.

La ganancia G del juego a largo plazo (tras n rondas) puede escribirse como $G = (1 + g)^n (1 - p)^n$, donde g y p denotan las fracciones de ganancia y pérdida. El autor toma $g = 0{,}20$ y $p = 0{,}17$, lo que implica una pérdida neta ($G < 1$). Sin embargo, un cálculo sencillo muestra que, para $g = 0{,}20$, cualquier valor de $p < 0{,}166...$ arrojará $G > 1$.

Así pues, la «predestinación» a la pérdida de riqueza no queda demostrada por el ejemplo propuesto, ya que este no es más que un caso particular en el que g y p conducen a dicho resultado. Un análisis completo muestra que no siempre es así y que, por tanto, $G < 1$ no es inexorable.

Manuel Megía
Madrid

En cuanto al modelo propuesto por Boghosian, me gustaría hacer las siguientes observaciones.

Primero, se trata de un modelo de suma cero, en el que la riqueza total es constante; es decir, no tiene en cuenta la creación de riqueza. Asumiendo implícitamente que la desigualdad es mala *per se*, el modelo obvia que una cierta concentración de riqueza es necesaria para crear más riqueza.

Segundo, con un peso tan grande de la riqueza previa de un individuo a la hora de determinar en qué dirección de la distribución se moverá, es difícil explicar que las herencias solo estén en el origen del 30 % de las grandes fortunas, un porcentaje que además ha disminuido en las últimas décadas, mientras aumentaba el índice de Gini («The origins of the superrich: The billionaire characteristics database»; Caroline Freund y Sarah Oliver, *Peterson Institute for International Economics Working Paper*, n.º 16-1, 2016).

Por último, el artículo afirma que estos modelos «demuestran que la tendencia innata de la riqueza es fluir hacia los más ricos». Pero que un modelo matemático describa con precisión un fenómeno no demuestra su correspondencia con la realidad subyacente. De hecho, el modelo busca parámetros χ, ζ y κ que den como resultado la distribución de riqueza de un país. Pero dichos parámetros no pueden deducirse sin conocer de antemano dicha distribución, lo que arroja dudas sobre el poder predictivo del modelo.

Alejandro Ruiz
Madrid

Responde Boghosian: *Sobre el comentario de Megía, es cierto que el resultado depende de los porcentajes escogidos. Pero nótese que estos dan al agente más pobre una mayor ganancia esperada y, aun así, este sigue perdiendo a largo plazo. Muchas personas considerarían justo un trato que ofreciese idénticas probabilidades de ganar o perder el 10 % . Y también creerían justo uno que asignase las mismas probabilidades a ganar un 20 % y a perder un 17 %. Que un modelo basado en esta observación logre describir con tanta precisión las distribuciones de riqueza sugiere que dicho mecanismo puede desempeñar un papel en la concentración de riqueza observada en las últimas décadas en países como EE.UU.*

A Ruiz: En efecto, el modelo no tiene en cuenta la producción ni el consumo, por lo que la riqueza total se conserva; tampoco la inmigración o la emigración, por lo que también se conservan los agentes económicos. Si se conocieran datos precisos al respecto sería sencillo incorporarlos, pero en una primera aproximación decidimos no hacerlo. Con todo, el hecho de que obtengamos una curva de Lorenz tan acorde con los datos empíricos sugiere una de (al menos) dos cosas. Primero, es posible que la producción y el consumo, aunque importantes para indicadores macroeconómicos como el PIB, no afecten demasiado a la curva de Lorenz; después de todo, la propia construcción de dicha curva factoriza los agentes totales y la riqueza total. Segundo, tal vez la producción y el consumo se anulen mutuamente en cierta medida.

*Con respecto a la segunda observación, hay muy poco consenso sobre esas cifras. Si bien el libro de Freund y Oliver afirmaba que el peso de las herencias había disminuido con el tiempo, dicha conclusión ha sido cuestionada en el trabajo «On the share of inheritance in aggregate wealth: Europe and the USA, 1900–2010», de Facundo Alvaredo, Bertrand Garbinti y Thomas Piketty (*Economica*, vol. 84, 2017). En él se estima que, hasta 2010, alrededor del 60 % de la riqueza privada de EE.UU. habría sido heredada en lugar de ganada. En su artículo los autores señalan que dicho porcentaje ha estado creciendo desde los años ochenta, un período en el que el índice de Gini ha aumentado. Esto concuerda con un resultado conocido en macroeconomía y llamado «la curva del gran Gatsby»: a medida que la desigualdad aumenta, el ascenso social se frena.*

Por último, para ver que en EE.UU. la riqueza ha estado fluyendo hacia arriba solo hay que mirar la evolución de la curva de Lorenz o del índice de Gini, el cual pasó del 79 % en 1989 al 86 % en 2016. Dicho esto, la observación del lector es procedente e incluso la reforzaría un poco: un modelo basado en agentes que describe con precisión un fenómeno macroscópico no debe tomarse como prueba de que su dinámica microscópica es correcta. Por poner un ejemplo físico, el agua, el aire y la melaza obedecen las mismas ecuaciones de dinámica de fluidos, pero sus interacciones moleculares son muy diferentes. No obstante, la medición precisa de la ecuación de estado de los gases (los coeficientes del virial) permite inferir detalles sobre sus interacciones moleculares. Por tanto, debemos apelar a la navaja de Occam: tenemos un modelo que con solo tres parámetros logra reproducir las curvas de Lorenz de una gran cantidad países con una precisión superior al 0,5 %. Hasta que llegue un modelo mejor, seguiremos estudiando este. Si encontramos fenómenos que contradigan los datos, lo mejoraremos o reemplazaremos. No obstante, el hallazgo de que en EE.UU. la riqueza se ha estado concentrando durante las últimas décadas no contraviene los datos empíricos.

CARTAS DE LOS LECTORES

Investigación y Ciencia agradece la opinión de los lectores. Le animamos a enviar sus comentarios a:

PRENSA CIENTÍFICA, S. A.
Muntaner 339, pral. 1.ª, 08021 BARCELONA
o a la dirección de correo electrónico:
redaccion@investigacionyciencia.es

La longitud de las cartas no deberá exceder los 2000 caracteres, espacios incluidos. Investigación y Ciencia se reserva el derecho a resumirlas por cuestiones de espacio o claridad. No se garantiza la respuesta a todas las cartas publicadas.



Estas alas, fabricadas a partir de plumas reales de paloma, han permitido desarrollar un nuevo tipo de robot volador.



LENTINK LAB/UNIVERSIDAD STANFORD

ROBÓTICA

Drones con plumas

Un robot inspirado en las palomas podría encabezar la próxima generación de vehículos autónomos voladores

Desde el malhadado vuelo de Ícaro, los humanos siempre hemos buscado inspiración en las aves a la hora de emprender nuestras iniciativas aéreas. Durante largo tiempo, sin embargo, la proeza de volar como los pájaros, con alas flexibles y plumosas, se ha mostrado inalcanzable. Una razón es que los ingenieros no acababan de entender bien la manera en que las aves controlan sus plumas. Ahora, dos trabajos prometen dar un vuelco a esta situación. Un equipo de investigadores ha diseñado un robot volador provisto de alas con plumas que, al igual que ocurre con las de las aves, pueden cambiar de forma en pleno vuelo. El resultado es una maniobrabilidad mucho mayor que la lograda por los drones rígidos.

Para diseñar su robot alado, los científicos usaron la técnica audiovisual conocida como «captura de movimiento» para grabar y estudiar la forma en que las palomas pliegan y flexionan las alas mientras vuelan. A partir de esos resultados determinaron que era posible controlar 20 plumas en cada ala de su robot, al que bautizaron como PigeonBot, mediante bandas elásticas conectadas a solo dos articulaciones. Además, aplicaron técnicas de adquisición y análisis de imágenes para estudiar las estructuras microscópicas que, durante el vuelo, enganchan transitoriamente entre sí las plumas de muchas especies aviares. El PigeonBot necesita plumas reales para funcionar, por lo que los investigadores aún han de encontrar la manera de reproducir artificialmente sus propiedades para continuar perfeccionando la técnica.

Los científicos diseñaron los movimientos de las alas y de las plumas del robot imitando los de palomas reales, explica Eric Chang, ingeniero mecánico de Stanford y coautor del estudio. Las aves pueden virar y ladearse bruscamente variando la forma de sus alas, una facultad que los investigadores quisieron integrar en su aparato. Las imágenes de captura de movimiento mostraron que, en buena medida, las palomas lo consiguen abriendo y cerrando la articulación de sus alas equivalente a nuestra muñeca.

Una vez que los investigadores construyeron un prototipo (un cuerpo de espuma de poliestireno equipado con sistemas de guía electrónica y bandas elásticas

para controlar las plumas de paloma), usaron un túnel de viento para estudiar el efecto de doblar las alas y determinar si funcionarían en condiciones de turbulencia realistas. El resultado fue positivo, lo que allanó el camino para las pruebas de planeo y viraje fuera del laboratorio. Chang, que controló el PigeonBot desde tierra, describe la experiencia como increíblemente angustiosa: «Cuando [el robot] aterrizó de una sola pieza, me desplomé en el suelo con sensación de alivio». Los científicos publicaron sus resultados el pasado mes de enero en la revista *Science Robotics*.

Las plumas de las palomas pueden adherirse automáticamente a sus vecinas para formar una superficie de vuelo lisa y flexible, y los científicos tuvieron que ingeniárselas para averiguar exactamente cómo lo hacen. Al igual que muchas especies aviares, las palomas lo consiguen gracias a ciertas estructuras microscópicas denominadas «cilios lobulados». Los ornitólogos las documentaron a principios del siglo xx; sin embargo, debido en parte a las limitaciones de la microscopía óptica de la época, supusieron que su función se limitaba a aumentar el rozamiento entre las plumas, algo similar a lo que ocurre cuando se frotan dos trozos de papel de lija, explica Teresa Feo, zoóloga del Museo Nacional de Historia Natural de Estados Unidos y coautora de un segundo trabajo publicado en *Science* también en enero. «Lo que descubrimos fue el mecanismo real de esos cilios: no generan rozamiento, sino que actúan más bien como ganchos», explica la investigadora. Los autores hallaron que esas pequeñas estructuras se sueltan cuando las aves doblan las alas y vuelven a unirse entre sí cuando las alas se extienden.

Llegar a esa nueva interpretación fue posible gracias a varias técnicas modernas como la microscopía electrónica de barrido, el microanálisis por rayos X y las tomografías computarizadas, apunta la también coautora del estudio Laura Matloff, ingeniera mecánica de Stanford. «Somos los primeros que hemos estudiado los cilios con nueva instrumentación», asegura.



Sin embargo, las plumas naturales siguen escondiendo misterios. Los investigadores hallaron una notable ausencia de cilios en las plumas de lechuzas y chotacabras, dos especies que acechan a sus presas durante la noche. Las microestructuras, que comparan con el velcro, emiten ruido cuando se separan, por lo que en estos cazadores sigilosos la evolución podría haber favorecido el vuelo silencioso sobre la unión entre plumas. «Parece un ejemplo bastante claro de evolución convergente, en el que se llegó a una solución de compromiso», señala Julia Clarke, paleontóloga de la Universidad de Texas en Austin que no participó en ninguno de los dos trabajos. La experta se siente intrigada por la historia evolutiva de los cilios, aunque admite que puede resultar difícil encontrar esas diminutas estructuras en el registro fósil.

Emular características que contribuyan a hacer superficies de vuelo suaves pero robustas podría tener un valor incalculable a la hora de diseñar alas artificiales capaces de cambiar de forma, un paso clave para diseñar drones de nueva generación. Es cierto que los típicos aparatos cuadricópteros se manejan con facilidad y pueden mantenerse suspendidos en el aire. No obstante, Chang sostiene que los drones alados serían más rápidos y silenciosos. El equipo de Stanford trata ahora de encontrar la mejor manera de diseñar un ala con forma tal que ofrezca no solo una mayor eficiencia, sino también la posibilidad de cambiar de forma dinámicamente.

Esta línea de investigación «señala el camino hacia nuevos modelos de robots voladores biomiméticos que tendrían múltiples aplicaciones», opina Phil Husbands, investigador de la Universidad de Sussex y experto en robótica inspirada en la naturaleza que no participó en los trabajos. «Un reto interesan-

---

CIENCIA DE LOS MATERIALES

Nueva venda hemostática

El nanomaterial con que está hecha acelera la coagulación

Las hemorragias profusas constituyen una de las principales causas de muerte evitable. A menudo los vendajes no consiguen detener el sangrado. Ahora, afirman haber inventado una venda que repele la sangre y las bacterias, al tiempo que promueve la rápida coagulación y se arranca sin reabrir la herida.

Un equipo de la Universidad Nacional de Singapur y de la Escuela Politécnica Federal de Zúrich que estaba desarrollando recubrimientos hemófugos de aplicación médica descubrió un efecto inesperado en una mezcla de nanofibras de carbono y silicona: acelera la coagulación. Así que pulverizaron la mezcla sobre una gasa de algodón corriente y aplicaron calor para que se adhiriera. En las pruebas de laboratorio y en los experimentos con ratas, el nuevo apósito promovió la producción de fibrinas, las proteínas que forman una malla en la herida que facilita la coagulación. El vendaje también permaneció seco porque repele la sangre, lo cual facilita despegarlo de la herida. Y un estudio con *Escherichia coli* mostró que las bacterias en solución no quedan adheridas a él. Los investigadores describieron sus hallazgos el pasado diciembre en *Nature Communications*.

Uno de los autores, Choon Hwai Yap, ingeniero biomédico en la Universidad Nacional de Singapur, afirma que serán precisas más pruebas para averiguar por qué las nanofibras facilitan la formación de la fibrina. Pero destaca que la fabricación del material es económica y reproducible a gran escala. «Creo que el nuevo vendaje puede



LENTINK LAB/UNIVERSIDAD STANFORD (*dron*); THOMAS FUCHS (*venda*)

te consistirá en desarrollar plumas artificiales blandas que puedan rivalizar con las reales en lo que respecta a su capacidad de cambiar de forma», añade.

Las alas con plumas constituyen «un elemento del todo inusual en ingeniería aeroespacial», pues construir una pluma artificial que funcione sigue planteando un desafío enorme, afirma el investigador principal de ambos estudios, David Lentink, ingeniero aeroespacial y zoólogo experimental de Stanford. Y las estructuras como los cilios lobulados son demasiado diminutas para las impresoras 3D actuales, agrega.

Aun así, Lentink opina que, en su encarnación actual, el PigeonBot podría ayudar a los zoólogos a entender mejor el modo en que las aves controlan las alas durante el vuelo. Estudiar aves vivas en un túnel de viento es complicado, y entrenarlas para que a una orden muevan únicamente el equivalente a una muñeca o a un solo dedo resulta prácticamente imposible. «Mi objetivo es desarrollar modelos de aves más realistas y documentar una amplia variedad de especies que exhiban tipos de vuelo muy distintos», añade. Los museos disponen de una enorme cantidad de plumas que podrían usarse en robots, lo cual permitiría a los científicos analizar esa diversidad de vuelos, explica Lentink. Y sustituir seres sintientes por robots puede reducir la necesidad de investigar con animales. «Existe un amplio abanico de cuestiones que podrían estudiarse con estos robots», asegura. «Y de todo ello también surgirán numerosos interrogantes científicos», concluye el investigador.

—Jim Daley

---

tener un gran efecto en las heridas graves, como las provocadas en accidentes de tráfico o en combate», explica Yap. «En tales situaciones se intenta detener la hemorragia lo antes posible impidiendo que la sangre mane, en lugar de absorberla y retirarla del cuerpo.»

Esko Kankuri, investigador en farmacología cardiovascular y regeneradora en la Universidad de Helsinki que no ha participado en el estudio, advierte de que serán necesarios ensayos en humanos para demostrar las virtudes de la venda. «Este estudio supone una demostración preliminar de las propiedades del material sobre la sangre en heridas recién abiertas que no revisten complicaciones», explica. «Los resultados son excelentes y alentadores, pero las condiciones de laboratorio distan mucho de las reales.»

—Jillian Kramer

BIOMEDICINA

Trampas de ADN

Al aferrarse al virus del dengue, permiten detectar la infección

Se ha diseñado una estructura hecha con fragmentos de ADN que sirve de trampa para el virus del dengue. La estructura, con forma de estrella, ha sido concebida para reconocer con precisión el virus en el torrente sanguíneo y fijarse a él; sería una prueba potente a la par que sencilla que detectaría esta enfermedad transmitida por mosquitos.

El dengue es la enfermedad contagiosa transmitida por vectores de más rápida expansión en el mundo, con una epidemia importante en 2019-2020. En su forma grave, que puede ser mortal, causa hemorragias internas. No existe ninguna vacuna ni tratamiento específico que gocen de amplia aceptación, por lo que su detección precoz resulta crucial.

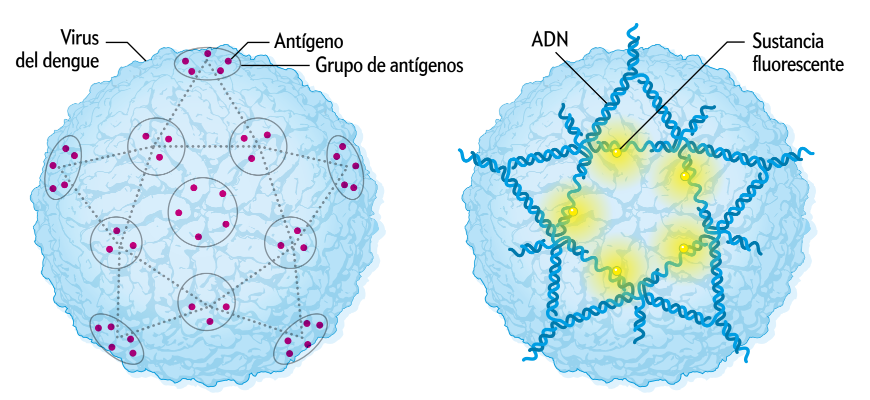
La superficie esférica del virus está erizada de antígenos, proteínas especiales que este emplea para fijarse a las células que infecta. Encabezado por Xing Wang, bioquímico de la Universidad de Illinois en Urbana-Champaign, un grupo de investigación ha construido con nanotecnología de ADN una estructura que imita la disposición de las proteínas en la superficie del virus. Las puntas y los vértices de esa «estrella de ADN» de cinco puntas encajan con los antígenos e incorporan moléculas que la hacen brillar. Esos puntos de agarre garantizan una fijación fuerte y muy precisa, según los investigadores: la estrella de ADN solo reconoce el virus que posee ese patrón en concreto. Una vez se produce la unión, la estrella emite fluorescencia o brilla, revelando la presencia del virus. «Es un gran ejemplo de cómo la nanotecnología del ADN puede resolver problemas biológicos reales», opina Mingxu You, director de un grupo de investigación en química de ácidos nucleicos en la Universidad de Massachusetts en Amherst, que no ha participado en el estudio. «Comparada con las técnicas actuales [de detección del dengue], esta sonda de ADN muestra una sensibilidad y una simplicidad muy interesantes.»

Las pruebas de referencia actuales exigen complejos equipos de laboratorio y personal cualificado. «Nuestra técnica es muy sencilla; solo se necesita un par de minutos y el coste es de solo 50 céntimos por análisis», explica Wang. En un artículo publicado en enero en *Nature Chemistry*, comparan su invención con las pruebas clínicas actuales y defienden su mayor sensibilidad y exactitud. Debería funcionar antes de que aparezcan los síntomas, y las nanoestructuras de ADN no son tóxicas ni dañinas para los tejidos humanos, afirman.

Añade Wang que la superficie del virus del dengue es compleja, por lo que para que las nanoestructuras encajen hay que dotarlas de formas geométricas complicadas. Los virus sencillos requerirían formas más sencillas.

Wang colabora ahora con Sherwood Yao, director ejecutivo de Atom Bioworks, en Carolina del Norte, con el objetivo de aplicar el mismo principio a otros virus, como el del zika o el de la gripe, y, más allá de ellos, a las bacterias o incluso a las células tumorales. A Yao, con experiencia en inteligencia artificial, le intrigaba la estrategia del método para reconocer patrones, que equipara a las técnicas de reconocimiento facial. La técnica ofrece «una interfaz programable en biología», afirma Yao. «Nuestra solución podría convertirse en un vehículo fundamental no solo para detectar el patógeno, sino para neutralizarlo.»

—Harini Barath



Los investigadores han construido una estructura con ADN que se une a ciertas proteínas (antígenos) con las que el virus del dengue se engancha a las células que luego infecta (*izquierda*). La estructura brilla cuando queda fijada al virus (*azul oscuro, derecha*).

FUENTE: «DESIGNER DNA ARCHITECTURE OFFERS PRECISE AND MULTIVALENT SPATIAL PATTERN-RECOGNITION FOR VIRAL SENSING AND INHIBITION», PAUL S. KWON ET AL. EN *NATURE CHEMISTRY*, VOL. 12, ENERO DE 2020. TAMI TOLPA (*ilustración*)

COMPORTAMIENTO ANIMAL

Fuego benéfico

Los murciélagos proliferan en los bosques parcialmente quemados

Los murciélagos son verdaderos insecticidas vivientes. Cada noche estos mamíferos alados se aventuran fuera de las grutas y de sus guaridas a la caza de millones de insectos, entre los cuales figuran plagas agrícolas y vectores de enfermedades. Pero la pérdida del hábitat y el cambio climático, por un lado, y las enfermedades infecciosas como el síndrome del hocico blanco, por el otro, están pasándoles factura. Un nuevo estudio añade otro problema a la lista: los incendios forestales. No por exceso, sino por defecto.

En el ecosistema de la Sierra Nevada de California, los quirópteros se han adaptado a los incendios ocasionales. Pero un siglo de prevención y lucha contra el fuego ha mantenido intactas ciertas zonas durante demasiado tiempo, lo que ha dado lugar a bosques cerrados con un sotobosque denso. «Queremos ver cómo esos cambios en la dinámica de los incendios están influyendo en la biodiversidad de estos mamíferos», explica Zack Steel, ecólogo de la Universidad de California en Berkeley que estuvo a cargo del proyecto mientras estudiaba el grado en el campus de Davis de la misma institución.

A lo largo de tres años, Steel y sus colaboradores desplegaron equipos de escucha en seis lugares de las montañas de Sierra Nevada para contarlos mediante la grabación de sus distintivos chillidos y chasquidos de ecolocalización. Tres habían sufrido un incendio hacía poco y los otros tres permanecían inalterados.

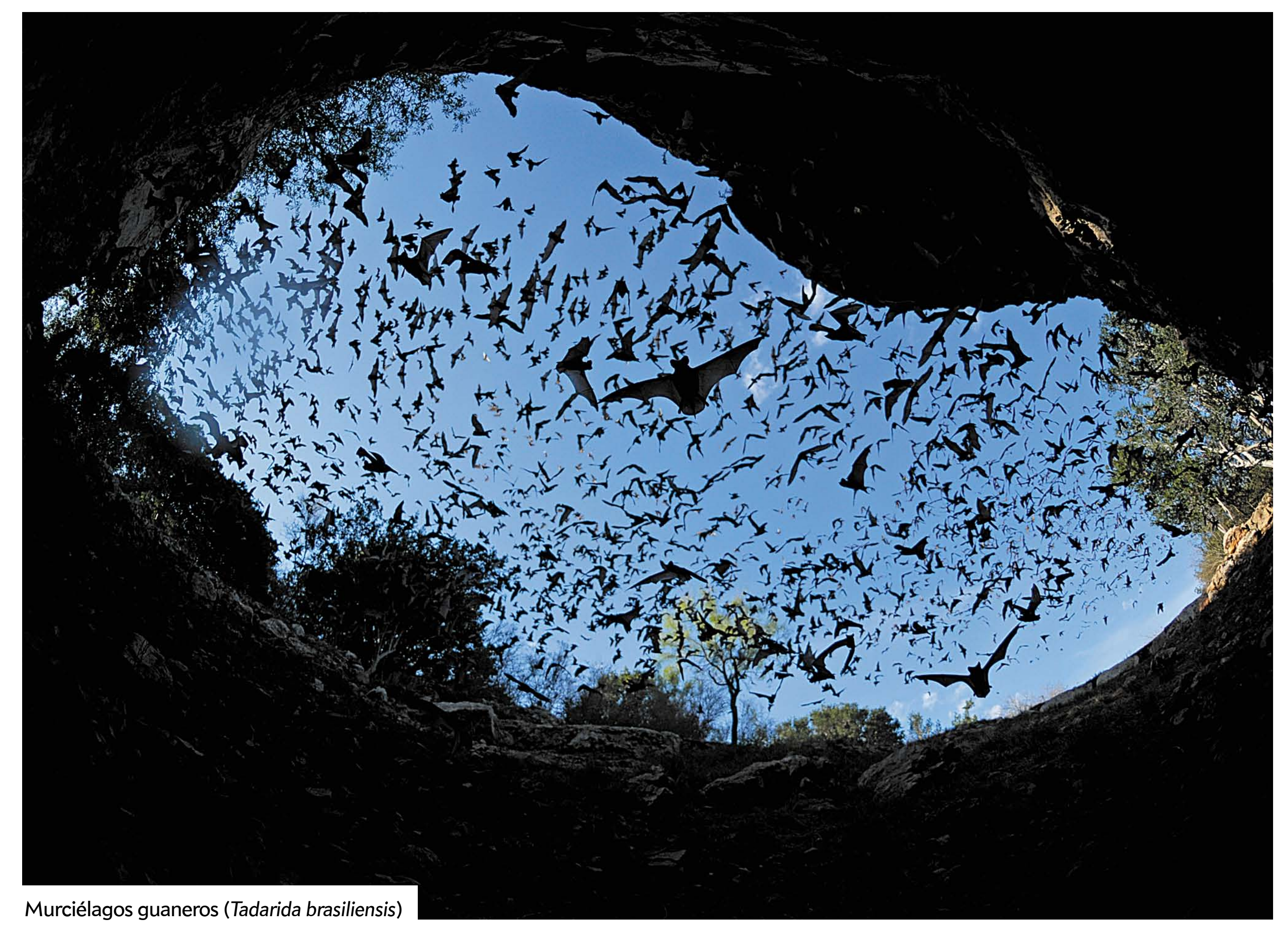
Diecisiete especies de quirópteros residen en esos bosques. El estudio reveló que ocho frecuentaban los lugares inalterados, mientras que 11 lo hacían en los quemados; algunas visitaban ambos. «Esperábamos ver un grupo de especies a las que el fuego beneficiaría, las adaptadas a los espacios abiertos, y otro, formado por las adaptadas a la espesura, a las que este perjudicaría, al preferir las zonas indemnes», explica Steel. «Pero incluso algunas de estas últimas solían frecuentar más las zonas chamuscadas.»

Según escriben los autores, lo ideal es un mosaico de zonas intactas y quemadas en diverso grado, que denominan pirodiversidad. Los resultados se publicaron el pasado diciembre en la revista *Scientific Reports*.

«Cuando las llamas generan una gran variación en el hábitat, son muchas las especies que se benefician de diferentes maneras», afirma el biólogo de la Universidad de Connecticut Andrew Stillman, que no participó en el estudio. «En su conjunto, la comunidad se hace más diversa, algo que es bueno para el paisaje.»

Extinguir con rapidez los incendios forestales hace que algunas especies pierdan sus fuentes de alimento y sus recursos. «El fuego es un elemento natural del ecosistema y muchos animales precisan de la alteración que este crea para disponer del tipo de hábitat que necesitan», añade Stillman. «Esto demuestra otra consecuencia negativa más de la supresión del fuego en los bosques de California adaptados a él.»

—Jason G. Goldman



Murciélagos guaneros (*Tadarida brasiliensis*)

PHILIP DALTON GETTY IMAGES

La industria cárnica producirá fósiles distintivos.

PALEONTOLOGÍA

Los fósiles del futuro

Los restos humanos y de animales domesticados acapararán el registro fósil

La humanidad se ha erigido en la fuerza dominante del planeta, que aboca a otras especies a la extinción, transforma la superficie terrestre y altera el clima. Nuestra influencia seguramente perdurará millones de años, pues, según una investigación publicada en marzo en *Anthropocene*, parece que también dominaremos la paleontología en el futuro remoto. El nuevo estudio afirma que los fósiles de mamífero de la actual era geológica consistirán casi por entero en restos humanos y de animales de granja y compañía.

«Nosotros y nuestros animales colmaremos el registro fósil de los mamíferos», asegura Roy Plotnick, paleontólogo de la Universidad de Illinois, en Chicago, y autor principal del estudio. «El registro fósil del futuro incluirá multitud de esqueletos humanos alineados.»

La reciente investigación supone la continuación lógica de un artículo de 2016 en el que Plotnick y sus colaboradores examinaron si las especies amenazadas acabarían en el registro fósil. Demostraron que menos del 9 por ciento de los mamíferos amenazados acabarían en él. Después de saber qué fósiles no estarían presentes, a Plotnick le intrigaba saber cuáles sí lo estarían.

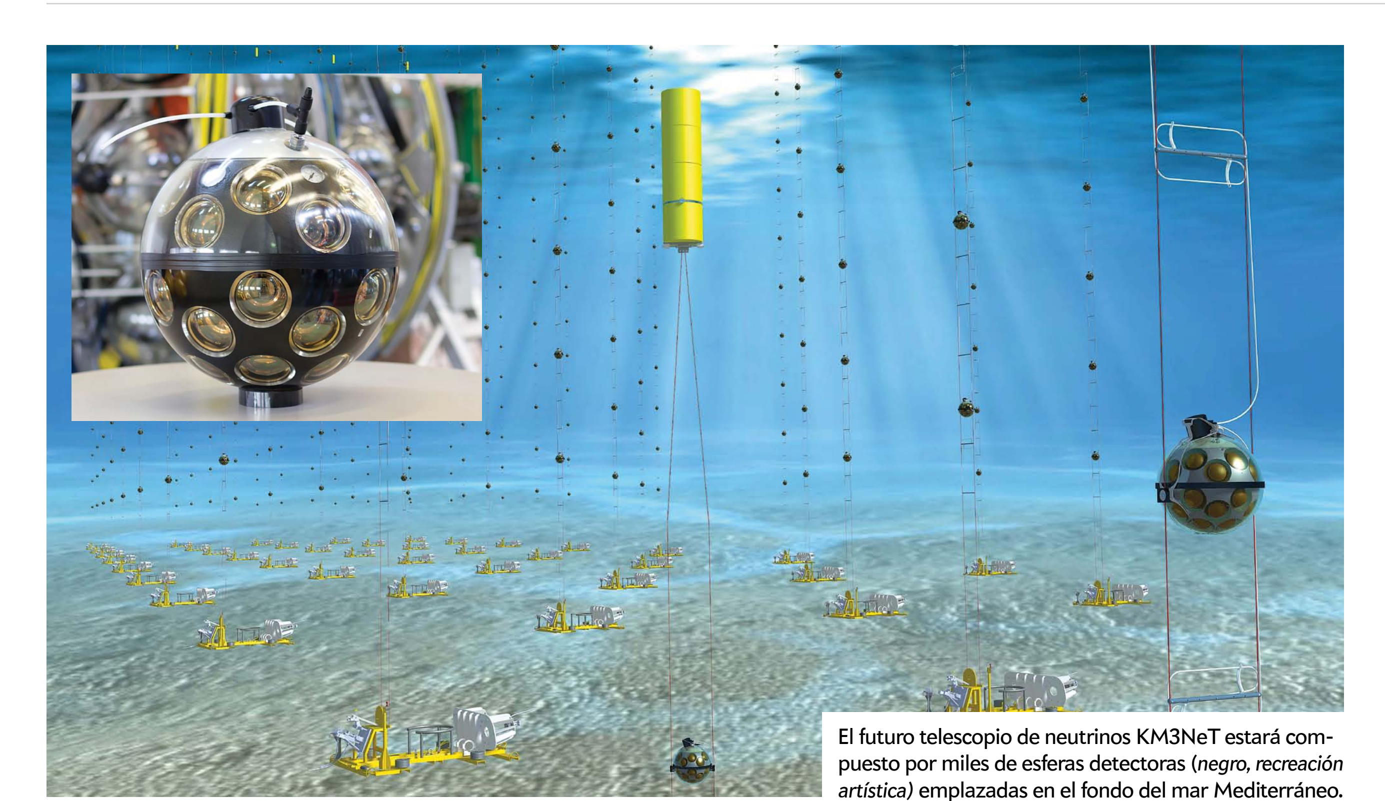
Así que él y la coautora Karen Koy, paleontóloga en la Universidad Estatal del Oeste de Misuri, revisaron meticulosamente cómo han variado a lo largo del tiempo la abundancia y la distribución de la especie humana, de los animales domesticados y de la fauna silvestre, en todo el mundo y en el estado de Michigan. En este último, compararon los cementerios y los vertederos con yacimientos donde suelen aparecer fósiles de mamíferos del Pleistoceno y del Holoceno. También tuvieron en cuenta el modo en que el tratamiento de los restos por parte de nuestra especie difiere de los procesos naturales.

Hallaron que, aparte del fuerte declive de la fauna en todo el planeta, el desarrollo humano también está acabando con las marismas y otros lugares propicios para los procesos de fosilización. Sumado esto a la vasta abundancia de personas y de animales domesticados —el 96 por ciento de la biomasa de mamíferos terrestres corresponde a personas y animales de granja, según un estudio de 2018—, de estos resultados se deduce que la probabilidad de que la fauna silvestre quede representada en el registro fósil es sumamente baja. (Plotnick y Koy también predicen que el perro y el gato sí quedarán conservados, dada su amplísima distribución geográfica.) Y los fósiles del futuro probablemente tendrán un aspecto muy distinto de los que hallamos hoy. Por ejemplo, incluirán huesos troceados procedentes de la industria cárnica, esqueletos humanos íntegros acumulados en los cementerios, y amontonamientos de cadáveres de ganado en los vertederos.

La enorme envergadura de esos cambios causa asombro, afirma Kate Lyons, paleoecóloga en la Universidad de Nebraska-Lincoln, ajena al nuevo estudio. «Conforme leía el artículo, me entristecía pensar en todas las preguntas de ecología que puedo plantearme con el registro fósil del Pleistoceno que en cambio no tendrán respuesta con el registro del futuro.»

—*Rachel Nuwer*





El futuro telescopio de neutrinos KM3NeT estará compuesto por miles de esferas detectoras (*negro, recreación artística)* emplazadas en el fondo del mar Mediterráneo.

ASTROPARTÍCULAS

Telescopio submarino

Un nuevo detector de neutrinos permitirá estudiar la materia oscura, las explosiones de supernova y otros fenómenos astrofísicos

Suspendidas cerca del fondo del mar Mediterráneo, frente a las costas de Francia e Italia, 126 esferas de cristal del tamaño de un balón de fútbol aprovechan el propio océano para buscar señales de materia oscura, supernovas y colisiones de estrellas de neutrones. Se trata de los primeros de muchos otros dispositivos de esta clase que desplegará el proyecto KM3NeT (https://www.km3net.org/), acrónimo de Telescopio de Neutrinos de un Kilómetro Cúbico.

Los neutrinos son partículas elementales carentes de carga eléctrica y que apenas poseen masa. «A diferencia de lo que ocurre con los rayos cósmicos, la trayectoria de los neutrinos no se ve afectada por los campos magnéticos del espacio intergaláctico, lo cual los convierte en mensajeros únicos», explica Walter Winter, astrofísico del Sincrotrón Alemán de Electrones (DESY) que no está implicado en el proyecto. «Su estudio complementa al que aportan otras fuentes, como la radiación electromagnética y las ondas gravitacionales.»

Los neutrinos apenas interaccionan con otras partículas, por lo que pueden atravesar extensas regiones de materia y recorrer distancias astronómicas sin sufrir alteraciones. Es precisamente ese comportamiento fantasmal lo que los convierte en candidatos idóneos para estudiar el cosmos. El KM3NeT ocupará un volumen efectivo de un kilómetro cúbico de agua (el equivalente a 400.000 piscinas olímpicas) repartido entre dos instalaciones que usarán el agua circundante a modo de lente gigantesca. Más de 6000 esferas, cada una de ellas equipada con 31 detectores de alta sensibilidad denominados tubos fotomultiplicadores, se engancharán a sendos cables anclados al fondo marino y que se mantendrán tensos por medio de boyas.

«Por cada millón de neutrinos [que atraviese el agua] tal vez uno o dos interaccionen con los quarks que componen los núcleos de los átomos de hidrógeno y oxígeno del agua circundante», indica el director de física y *software* del proyecto, Paschal Coyle, del Centro de Física de Partículas de Marsella. «Puesto que los neutrinos cósmicos poseen una energía elevada, tales interacciones generan partículas cargadas que se mueven a gran velocidad.»

Tanto es así que, en el interior del agua, tales partículas avanzan más rápido que la propia luz en dicho medio. Ello genera un efecto óptico que Coyle compara con el estallido que produce un avión cuando rompe la barrera del sonido. La radiación liberada en el proceso, conocida como luz de Cherenkov, es entonces analizada por los detectores submarinos, lo que a la postre permite reconstruir la energía y la dirección del neutrino incidente.

En comparación con los demás telescopios de neutrinos existentes, «KM3NeT será único, especialmente por su capacidad para observar el cielo del hemisferio sur con una resolución direccional y energética sin precedentes, además de por su gigantesco tamaño», explica Winter.

La localización francesa del experimento, cuya finalización se prevé para 2024, detectará los neutrinos de baja energía que se generan cuando los rayos cósmicos interaccionan con la atmósfera terrestre. Conforme atraviesan el planeta, estas partículas proporcionan una radiografía de su interior. El emplazamiento italiano, que se espera que comience a operar en 2026, se centrará en los neutrinos generados en explosiones de estrellas lejanas, así como en los que, según diversas teorías, podrían producirse en zonas con una gran densidad de materia oscura cuando esta colisione consigo misma.

Un aspecto tal vez curioso es que el nuevo telescopio obtendrá imágenes mucho más nítidas cuando mire «hacia abajo». Ello se debe a que de esta manera podrá usar la Tierra a modo de filtro y evitar así las múltiples partículas que se generan continuamente en la atmósfera cuando los rayos cósmicos chocan contra ella. De todas las partículas producidas de este modo, solo los neutrinos son capaces de atravesar el planeta.

—Dhananjay Khadilkar

PROYECTO KM3NET

CIENCIA DE LOS MATERIALES

Estructuras que adoptan múltiples formas

Un nuevo tipo de ladrillos plegables promete aplicaciones en la fabricación de nanodispositivos

Las figuras de corte escultórico que ocupan el laboratorio de Bas Overvelde, en el Instituto de Física Atómica y Molecular de los Países Bajos (AMOLF), no son tan simples como parecen. Construidas a partir de múltiples piezas con forma de prisma y cuyas caras se conectan mediante bisagras flexibles, pueden metamorfosearse con facilidad y adoptar el aspecto de estrellas tridimensionales, cilindros o esferas, entre otras posibilidades.

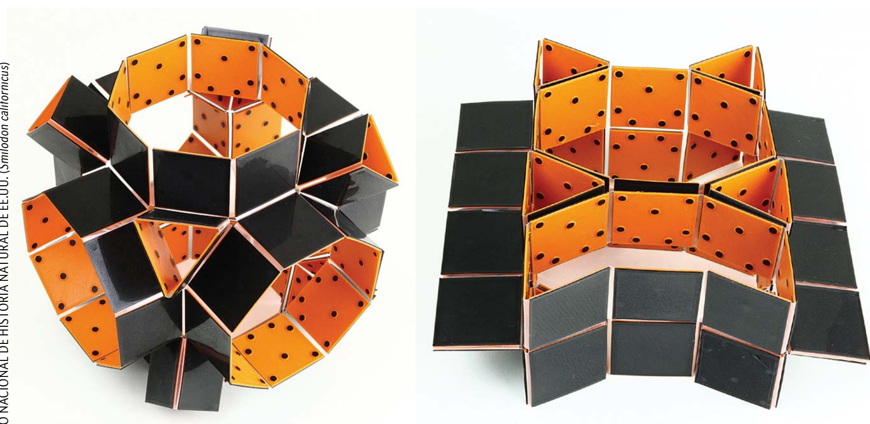
Overvelde sugiere pensar en un brazalete elástico: una estructura que cuenta con dos posiciones estables, una recta y otra enroscada. La diferencia con los objetos de su laboratorio es que, cuando a estos se les aplica presión, pueden plegar sus múltiples bisagras para adoptar decenas de configuraciones distintas. Overvelde y sus colaboradores se basaron en simulaciones por ordenador para explorar diversos ensamblajes complejos de sus unidades básicas, gracias a lo cual hallaron todas las posibles formas que podían tomar las diferentes combinaciones. Varias construcciones virtuales de gran tamaño superaron el centenar de configuraciones estables. Los resultados se publicaron el pasado mes de diciembre en *Nature Communications*.

Al diseñar y simular figuras que se pliegan en formas predecibles, los investigadores confían en simplificar la fabricación de robots diminutos y materiales con estructura cambiante. Si estos objetos pueden mutar con facilidad en formas específicas y estables, se necesitarán menos herramientas para doblarlos o ensamblarlos. Además, ciertas formas y estructuras internas pueden aportar resistencia a la vez que consiguen que los objetos sean elásticos. Por ejemplo, «los huesos poseen una microestructura que los hace más ligeros al tiempo que permanecen rígidos», señala Overvelde. «Con nuestros materiales intentamos obtener esas mismas características.»

Aunque el nuevo estudio explora la escala centimétrica (aproximadamente el mismo tamaño que las figuras de papiroflexia tradicionales), Overvelde señala que tales objetos deberían funcionar del mismo modo con independencia de sus dimensiones. Por ahora, el grupo se centra en los aspectos básicos del problema: «No fabricamos piezas a escalas menores, sino que tratamos de definir nuevos conceptos», señala el investigador.

Esos conceptos han llamado la atención de varios expertos en ciencia de materiales. Itai Cohen, quien no participó en el trabajo pero que dirige una investigación similar en la Universidad Cornell, afirma que los resultados de Overvelde suponen «una verdadera hazaña», tanto en lo que se refiere a la investigación en sí como a sus implicaciones. «Hablamos de dispositivos construidos con el equivalente a cartón y cinta adhesiva de doble cara. Pero la verdadera cuestión es: ¿podrán emplearse para construir sistemas robóticos?», observa Cohen. «El número de configuraciones posibles dicta qué es capaz de hacer un robot, cuántas rejillas de difracción podemos fabricar o con cuántas superficies químicas podemos trabajar.»

—*Caroline Delbert*



Una nueva clase de objetos es capaz de plegarse en numerosas formas estables.

AGUSTIN INIGUEZ-RABAGO Y JOHANNES T. B. OVERVELDE/INSTITUTO DE FÍSICA ATÓMICA Y MOLECULAR DE LOS PAÍSES BAJOS; MUSEO NACIONAL DE HISTORIA NATURAL DE EE.UU. (*Smilodon californicus*)

AGENDA

EXPOSICIONES VIRTUALES

Un mundo de partículas
Museo de Ciencias de Londres
artsandculture.google.com/partner/science-museum

Grandes descubrimientos del telescopio espacial Hubble
NASA
artsandculture.google.com/partner/nasa

Deep time
Museo Nacional de Historia Natural de EE.UU.
Washington
naturalhistory.si.edu/visit/virtual-tour



Infectious disease
Museo de Ciencia Koshland
Academia Nacional de Ciencias de EE.UU.
www.koshland-science-museum.org

OTROS

Hasta el 16 de abril
Esto del cambio climático va en serio
Concurso de relatos breves (con categorías general e infantil)
Convoca: Museo de la Ciencia de Valladolid
www.museocienciavalladolid.es

Hasta el 20 de abril
Ciencia clip
Concurso de vídeos de ciencia para estudiantes de secundaria
Convoca: Cátedra de Cultura Científica de la Universidad del País Vasco
cienciaclip.naukas.com

Hasta el 20 de abril
Ciéncia-me un cuento
Concurso de relatos científicos dirigidos al público infantil
Convoca: Sociedad de Científicos Españoles en Reino Unido
sruk.org.uk/es

Hasta el 22 de abril
On zientzia
Concurso de vídeos de ciencia y tecnología
Convoca: Elhuyar y Centro Internacional de Física de San Sebastián
www.onzientzia.tv/

COMUNICACIÓN Y SALUD

El coronavirus más mediático

La difícil relación entre la «ciencia exprés» y los medios de comunicación

IGNACIO LÓPEZ-GOÑI



GETTY IMAGES/FEODORA CHIOSEA/ISTOCK (*público*); GETTY IMAGES/OLGA BELIAEVA/ISTOCK (*virus*); COMPOSICIÓN INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

En el momento de escribir este texto, ya pueden consultarse más de 600 artículos en PubMed sobre el nuevo coronavirus (SARS-CoV-2) o la enfermedad que causa (COVID-19), además de otros tantos disponibles en los repositorios de artículos todavía no revisados (*preprints*). Jamás en la historia de la ciencia ha habido tanto conocimiento sobre un virus a los dos meses de haberse descubierto. Es una muestra de las posibilidades que tenemos hoy en día para combatir este tipo de amenazas.

Sin embargo, debido a la necesidad de compartir datos por la urgencia del tema, algunos de esos trabajos se han publicado sin pasar por los controles de calidad habituales (la situación es tan excepcional que el repositorio *bioRxiv* ha publicado en su web un mensaje de aviso, en el que se recuerda que los numerosos trabajos que se están recibiendo sobre el nuevo coronavirus son informes preliminares que no han sido revisados por pares y que, por tanto, «no deben ser considerados concluyentes, ni guiar la práctica clínica ni el comportamiento relacionado con la salud, ni ser comunicados en los medios como información verificada»). De hecho, varios de estos «artículos exprés» ya han tenido que retirarse porque se ha detectado que contenían errores.

También por primera vez en la historia, estamos viviendo una epidemia a tiempo real: todos los medios de comunicación, varias veces al día, todos los días en todo el planeta están hablando del nuevo coronavirus. Una ebullición mediática a la que hay que añadir el efecto multiplicador de las redes sociales.

La relación entre una «ciencia exprés», que comete errores por las prisas, y una sociedad hiperconectada, en la que la información (contrastada o no) se difunde a un ritmo vertiginoso, es, cuando menos, difícil. Si las cosas no se hacen bien, corremos el riesgo de promover otra «pandemia», de alarma y desconcierto, que poco ayuda a gestionar la crisis real. Veamos algunos ejemplos que ilustran la complejidad de la situación.

El coronavirus no se ha escapado de ningún laboratorio

Uno de los artículos que menos ha tardado en retirarse ha sido el que sugería que el nuevo SARS-CoV-2 era una mezcla artificial entre un coronavirus y el VIH. El 30 de enero fue publicado en el repositorio *bioRxiv* por un equipo encabezado por Prashant Pradhan, del Instituto de Tecnología de la India. El 2 de febrero fue retirado por los propios autores, al com-

probar que había errores en los análisis bioinformáticos y en la interpretación de los mismos. Sin embargo, y por desgracia, ha sido uno de los artículos más comentados en las redes sociales, lo cual ha promovido el bulo de que el SARS-CoV-2 se había creado por ingeniería genética en un laboratorio.

Conforme han ido creciendo los datos disponibles, otros investigadores, liderados por Hong Zhou, de la Academia de Ciencias Médicas de Shandong, han comparado el genoma del SARS-CoV-2 con el de cientos de coronavirus de murciélagos. Sus resultados, publicados el 2 de marzo en *bioRxiv*, sugieren una fuerte relación entre ambos genomas. Concluyen que el SARS-CoV-2 ha surgido de forma natural por recombinación entre virus presentes en murciélagos y otras especies animales. Así pues, el nuevo coronavirus no se ha escapado de ningún laboratorio ni es fruto de la ingeniería genética. La naturaleza se basta y se sobra para generar este y otro tipo de nuevos virus.

Y el pangolín se hizo famoso

Los coronavirus tienen su almacén, o reservorio, en los murciélagos. Sabemos que el coronavirus responsable del síndrome respiratorio agudo grave que surgió en 2002 (SARS-CoV) pasó de los murciélagos a las civetas y de estas a los humanos. Sabemos también que el coronavirus que causa el síndrome respiratorio de Oriente Medio (MERS-CoV), aparecido en 2012, pasó de los murciélagos a los dromedarios y de ahí al ser humano. Pero en el caso del SARS-CoV-2 todavía no se sabe cuál ha sido la especie intermediaria; no se ha aislado el patógeno en ningún otro animal. La cuestión sigue, por tanto, abierta.

Uno de los primeros trabajos sobre este tema, publicado en enero por Wei Ji, de la Universidad de Pekín, y sus colaboradores en *Journal of Medical Virology*, relacionaba el coronavirus con las serpientes. Los autores de la investigación analizaron 276 secuencias de distintos coronavirus. Según los resultados, lo más similar al SARS-CoV-2 eran dos serpientes: *Bungarus multicinctus* (una serpiente venenosa de Taiwán) y *Naja atra* (la cobra china), ambas presentes de forma habitual en los mercados de animales vivos en China. ¿Eran las serpientes el origen del nuevo coronavirus?

Días después, un equipo de la Universidad de Michigan encabezado por Chengxin Zhang publicaba otro trabajo, también en *bioRxiv*, en el que se revisaban esos resultados preliminares. Mediante otros métodos bioinformáticos y bases de datos, llegaban a una conclusión bien distinta: lo más probable era que el intermediario del SARS-CoV-2 fuera un mamífero o un ave, no una serpiente.

Los pangolines son unos simpáticos mamíferos con grandes escamas. Cuando se sienten amenazados, se encogen en forma de bola. Se alimentan de hormigas y termitas a través de una lengua larga y pegajosa. En Asia y África son muy conocidos y, aunque es una especie protegida (se halla en peligro de extinción), son víctimas del tráfico ilegal: su carne es muy demandada porque se considera una exquisitez y sus escamas se emplean en la medicina tradicional. En el resto del mundo, en cambio, prácticamente nadie conocía al pangolín. Hasta que llegó el coronavirus y lo hizo famoso.

En un primer trabajo, publicado el 17 de febrero en *bioRxiv*, Kangpeng Xiao, de la Universidad Agrícola del Sur de China, y sus colaboradores compararon coronavirus aislados de pangolines de Malasia con el SARS-CoV-2. Encontraron una alta coincidencia. En particular, el dominio de la glicoproteína S de la superficie del virus que se une al receptor celular era prácticamente idéntico entre ambos virus, con solo un aminoácido de diferencia. Los estudios genómicos sugerían, por tanto, que el SARS-CoV-2 se había originado por una recombinación entre coronavirus de pangolín y de murciélago. Los pangolines habrían actuado a modo de intermediarios en el «viaje» del coronavirus de los murciélagos a los humanos. Otros trabajos preliminares aislaron secuencias de coronavirus de muestras de pangolines congelados o provenientes del comercio ilegal y encontraron una gran similitud con el SARS-CoV-2. Fue entonces cuando todos los medios de comunicación se centraron en el pangolín. Su foto fue portada durante unos días en revistas y televisiones de todo el mundo, cual estrella de Hollywood. El coronavirus probablemente le haya salvado de la extinción.

Sin embargo, la fama le duró poco tiempo. Enseguida se publicó que las semejanzas entre el SARS-CoV-2 y el coronavirus del pangolín no se referían al genoma completo. Se reconoció que pudo haberse producido un error de comunicación entre los bioinformáticos y el grupo de investigación. La semejanza entre el ARN del SARS-CoV-2 y el del pangolín era del 90,3 por ciento. Posteriormente, en otro trabajo más exhaustivo publicado en *Journal of Medical Virology*, Xingguang Li, de la Universidad de Bioingeniería de Wuhan, y su equipo analizaron 70 genomas de cepas del SARS-CoV-2 aisladas en 12 países entre el 24 de diciembre de 2019 y el 3 de febrero de 2020 y los compararon con otros de coronavirus aislados de murciélagos y de dos pangolines. Estudiaron especialmente el gen de la glicoproteína S de la envoltura del virus. Los resultados revelaron que el coronavirus del murciélago era el más parecido al SARS-CoV-2, más incluso que los coronavirus de los dos pangolines analizados. Los autores concluyeron que el nuevo coronavirus SARS-CoV-2 no proviene de los pangolines, sino probablemente de murciélagos a través de otra especie animal diferente al pangolín.

La cuestión sobre el origen del nuevo coronavirus sigue sin respuesta. No podemos descartar que cuando se analicen genomas de coronavirus de más pangolines se encuentren algunos con una mayor similitud con el SARS-CoV-2, pero, de momento, el pangolín queda absuelto.

¡El coronavirus muta!

Hace unos días fue portada de algunos medios de comunicación que el coronavirus en Brasil había mutado «¡tres veces!». *Mutante* es una palabra que asusta a mucha gente. Se piensa que un mutante es un ser perverso y siempre malo. Que si el virus muta, será que se está haciendo más virulento.

Pero es que resulta que los virus mutan permanentemente. Viven mutando. Cuando hablamos de virus no estamos refiriéndonos a un solo individuo, sino a una población. A miles de millones de individuos que se están multiplicando a una velocidad vertiginosa. Una preparación de cultivo de virus puede contener fácilmente 10.000 millones de partículas víricas por mililitro. Además, en constante mutación. Como el coronavirus, muchos virus tienen un genoma de ARN y la enzima que se encarga de copiarlo, la ARN polimerasa, es muy torpe e introduce muchos errores en cada copia. Esos errores son mutaciones. Fallos que, además, no se corrigen, porque los virus carecen de sistemas de reparación —algo que los seres celulares sí tenemos—. Son muchos, se multiplican muy rápido y varían mucho. En los virus, es como si la evolución fuera a cámara rápida. Por eso, en la taxonomía de estos microorganismos no se emplea el término «especie» (como







LOS ÚLTIMOS ESTUDIOS han desmentido que las serpientes *Bungarus multicinctus* (*izquierda*) y *Naja atra* (*derecha*), y los pangolines (*abajo*) sean el origen del SARS-CoV-2.

en los animales, las plantas o las bacterias), si no «cuasiespecie». Una población de virus es, en realidad, una nube de mutantes, con pequeñas diferencias genéticas, en la que se puede llegar a definir una secuencia genética de consenso.

Del nuevo coronavirus tenemos ya muchos genomas completos secuenciados, que se están analizando y nos dan mucha información. Por ejemplo, el estudio de 489 de estos genomas aislados de muestras obtenidas de 33 países demuestra que todos están relacionados entre sí, presentan unas pocas mutaciones y comparten un origen común, que se puede fechar entre noviembre y diciembre de 2019. Esto vuelve a demostrar que el origen del SARS-CoV-2 es natural y que en esas fechas debió de ocurrir la primera infección humana, seguida de una transmisión entre personas sostenida en el tiempo.

Otro artículo que también ha dado mucho que hablar en los medios ha sido el que sugería que hay dos cepas del SARS-CoV-2. Lo publicaron en marzo en *National Science Review* Xiaolu Tang, de la Universidad de Pekín, y sus colaboradores. Tras analizar 103 genomas del SARS-CoV-2, estos investigadores concluyeron que el virus había evolucionado en dos variantes o «cepas»: la S, más antigua pero menos frecuente (30 por ciento), y la L, más reciente pero más prevalente (70 por ciento). La diferencia entre ambas cepas corresponde a una mutación en un aminoácido: una serina en la cepa S por una leucina en la L. Según los científicos, la cepa L sería más *aggressive* —ahora veremos por qué lo hemos escrito en el idioma original—. Aunque en su artículo dicen literalmente que «no está claro que la cepa L sea más virulenta» y que «el estudio es limitado y hace falta relacionarlo con datos epidemiológicos y clínicos», su repercusión en los medios ha sido enorme. La mayoría han anunciado que el virus había mutado y que había una cepa más frecuente y mucho más virulenta. En realidad, los autores no han afirmado esto. Todo ha sido un problema lingüístico, de traducción e interpretación. Y es que *aggressive* (en inglés) no significa «agresivo» ni «virulento». En este contexto, significa «más transmisible y que se replica más rápidamente» (por eso sería una cepa más prevalente, a pesar de haber evolucionado más tardíamente). No solo no hay datos que demuestren que la cepa L es más virulenta, sino que incluso otros autores han cuestionado la validez de este estudio y han solicitado que se retire.

En efecto, el SARS-CoV-2, como todos los virus, muta. Y lo más probable, si lo comparamos con otros eventos anteriores, es que esa constante mutación haga que el virus se adapte mejor a su hospedador, nosotros, y se vaya haciendo cada vez menos letal (causando síntomas más leves) pero se propague mejor. Eso es lo que al virus le interesa.

Conclusión

Nunca hemos tenido tanto conocimiento científico y capacidad técnica para enfrentarnos a una epidemia de este tipo. Pero la ciencia necesita reposo, tiempo, repetir experimentos, que otros confirmen nuestros resultados, que nos evaluemos unos y otros. El quehacer científico no siempre es compatible con las prisas de los medios, que exigen mucha información y de forma inmediata. La ciencia está respondiendo a los retos que plantea el nuevo coronavirus con cientos de publicaciones, en abierto, para que puedan ser compartidas por toda la comunidad de investigadores. Estupendo. Pero tendremos que aprender a comunicar y compartir ciencia en tiempos de crisis, si no queremos generar una angustia y pánico innecesarios.

Ignacio López-Goñi *es catedrático de microbiología en la Universidad de Navarra. Colabora en varios medios y es autor de los blogs* microBIO *y* El rincón de Pasteur*, en SciLogs.*

PARA SABER MÁS

Protein structure and sequence re-analysis of 2019-nCoV genome does not indicate snakes as its intermediate host or the unique similarity between its spike protein insertions and HIV-1. Chengxin Zhang et al. en *bioRxiv*, 4 de febrero de 2020.

Evolutionary history, potential intermediate animal host, and cross-species analyses of SARS-CoV-2. Xingguang Li et al. en *Journal of Medical Virology*, febrero de 2020.

A novel bat coronavirus reveals natural insertions at the S1/S2 cleavage site of the spike protein and a possible recombinant origin of HCoV-19. Hong Zhou et al. en *bioRxiv*, marzo de 2020.

On the origin and continuing evolution of SARS-CoV-2. Xiaolu Tang et al. en *National Science Review*, marzo de 2020.

Seguimiento de la epidemia de coronavirus **https://nextstrain.org/ncov**

EVOLUCIÓN

La increíble diversidad de las aves canoras

Descubren un extraño cromosoma que habría favorecido la evolución de nuevos rasgos

KATE WONG



ENTRE LAS ESPECIES DE AVES CANORAS que poseen el cromosoma extra están el diamante de Gould (*1*) el carricero de Blyth (*2*), la alondra común (*3*), el camachuelo común (*4*), la graja (*5*), el jilguero lugano (*6*), el canario común (*7*), el escribano cabeciblanco (*8*) y la golondrina común (*9*).

CYRIL LAUBSCHER, GETTY IMAGES (*1*); OLEG MINITSKIY, GETTY IMAGES (*2*); LES STOCKER, GETTY IMAGES (*3*); REINHARD HOLZL, GETTY IMAGES (*4*); KIM TAYLOR, GETTY IMAGES (*5*); ALAMY (*6*); FERNANDO SÁNCHEZ DE CASTRO, GETTY IMAGES (*7*); HANNE Y JENS ERIKSEN, NATURE PICTURE LIBRARY (*8*); DP WILDLIFE VERTEBRATES ALAMY (*9*).

Cuando un pedazo de roca espacial llameante de 10 kilómetros de ancho cayó sobre lo que hoy es el Golfo de México, hace 66 millones de años, provocó una amplia devastación que aniquiló a más del 75 por ciento de las formas de vida presentes en la Tierra. El asteroide de Chicxulub, que es el nombre que se le dio a dicha roca, es más conocido como el asesino de los dinosaurios. Pero, aunque condenó a la extinción a *Tyrannosaurus rex* y a *Triceratops*, a los saurópodos y a los hadrosaurios, el asteroide colocó en la casilla inicial del camino que le conduciría hacia la gloria a un linaje de dinosaurios: el de las aves modernas.

Las aves iniciaron su camino hace más de 150 millones de años, evolucionando a partir de los dinosaurios carnívoros llamados terópodos, y alcanzaron un impresionante grado de diversidad durante los primeros 85 millones de años de su existencia. Pero los antepasados de las aves actuales (del linaje de las neor-

nitas) eran simples actores secundarios en comparación con el protagonismo de aves arcaicas como las enantiornitinas, que eran las que llevaban la voz cantante. Sin embargo, cuando cayó el asteroide, la suerte de las aves neornitas cambió. El impacto provocó la extinción de todos los dinosaurios no avianos y de la mayoría de las aves. Solo las neornitas resistieron al suceso apocalíptico. Este conjunto de supervivientes daría lugar a una de las radiaciones evolutivas más grandes de todos los tiempos.

En la actualidad, existen más de 10.000 especies de aves, lo que las convierte en la segunda clase de vertebrados vivos con más número de especies, superada solo por la de los peces óseos. Las hay de toda forma y tamaño: desde el avestruz terrestre, que puede pesar más de 135 kilogramos, al siempre zumbador colibrí zunzuncito, de menos de dos gramos. Han colonizado prácticamente toda porción de tierra y agua del planeta, de los sofocantes trópicos a los polos helados. Y se han diversificado hasta llegar a cubrir un amplio espectro de nichos según su alimentación, desarrollando adaptaciones que les permiten comer de todo, desde algas microscópicas hasta mamíferos de gran tamaño.

Resulta increíble que casi la mitad de esas especies sean cantoras, caracterizadas por un órgano especial para la fonación. El grupo incluye a currucas, canarios, alondras y otros cantadores melifluos, pero también a los estridentes —para el oído humano— cuervos y sus parientes. Para situar esa cifra en perspectiva, diremos que existen aproximadamente tantas especies vivas de aves canoras como las que hay de mamíferos.

¿Cómo consiguió este grupo particular de aves ser tan extraordinariamente diverso? Los biólogos llevan buscando desde hace tiempo una respuesta, y han estado explorando el registro fósil y las secuencias de ADN de las aves modernas en busca de pistas. Pero, al margen de ubicar el origen de las aves canoras (Australia), gran parte de estos estudios habían arrojado resultados no concluyentes o contradictorios. Seguían sin conseguir una imagen detallada de dónde y cuándo se separaron los linajes que condujeron a las aves canoras modernas —y, en consecuencia, los factores que impulsaron esta radiación.

En ausencia de pruebas concluyentes que demostraran cómo ocurrió todo el proceso, los investigadores han adelantado distintas teorías rivales sobre la diversificación de las aves canoras que se basan, entre otros factores, en el cambio climático, la tectónica de placas y la selección sexual (en la que las preferencias por un tipo de pareja estimularon la evolución).

Ahora, un nuevo hallazgo ha causado una gran excitación en este campo. Al parecer, todas las aves canoras poseen un extraño cromosoma extra que no está presente en las demás aves. El descubrimiento sugiere la existencia de un mecanismo genético con el que crear barreras a la reproducción entre poblaciones de una especie, lo que fomenta la especiación. Todavía queda mucho por aprender sobre esta dotación auxiliar de ADN, pero algunos investigadores ya se están preguntando si podría ser el secreto del deslumbrante éxito reproductivo de las aves canoras.

El GRC podría haber proporcionado a las aves canoras un extraño fragmento de ADN adicional

Genes restringidos

El cromosoma en cuestión recibe el nombre de cromosoma restringido a la línea germinal (GRC, por sus siglas en inglés), llamado así por que se halla presente en las células reproductoras (óvulos, espermatozoides y sus precursores), pero no en el resto de las células del cuerpo (somáticas). Las células progenitoras de los óvulos y los espermatozoides, contienen GRC, pero, cuando un espermatozoide se ha desarrollado por completo, el GRC ha sido eliminado de él. El cromosoma se transmite, pues, a la descendencia exclusivamente a través de la hembra.

Hasta hace muy poco, la existencia del GRC se conocía solo en dos aves canoras: el diamante cebra y su pariente cercano, el capuchino del Japón. Parecía más una rareza de estas dos especies. Pero, cuando los investigadores decidieron buscarlo en otros linajes de aves, apareció un patrón llamativo. En un artículo publicado el pasado junio en *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*, Anna Torgasheva y Pavel Borodin, de la Academia Rusa de Ciencias, Denis Larkin, de la Universidad de Londres, y sus colegas, informaron de que las 16 especies de aves canoras que examinaron (una muestra que incluía representantes de diversos grupos del árbol familiar de las aves cantoras) poseían el GRC; ninguna de las ocho especies representativas de otros grupos importantes de aves lo poseía. Y aún hay más: los GRC que encontraron diferían considerablemente entre una especie y otra, incluso entre algunas con un parentesco muy cercano, lo que sugiere que el cromosoma evolucionó rápidamente en estos linajes desde que apareció en su antepasado común, se cree que hace unos 35 millones de años.

Ya se habían encontrado con anterioridad en otros organismos células que portaban cromosomas extra llamados cromosomas B [*véase* «Cromosomas parásitos», por Josefa Cabrero y Juan P. M. Camacho; Investigación y Ciencia, julio de 2009] . Pero su presencia era errática, siendo diferente entre miembros de la misma especie o incluso entre diferentes células del mismo individuo. El GRC, en cambio, es «un elemento obligatorio presente en la línea germinal de las aves canoras», remarca Larkin. Esta ubicuidad sugiere que el GRC es más influyente que los cromosomas B.

Sin embargo, las funciones del GRC siguen siendo un misterio. Con todo, han salido a la luz algunas pistas. En otro estudio reciente, que ha sido depositado en el servidor de preimpresión *bioRxiv* pero que todavía no se ha publicado en una revista sujeta a revisión por pares, Cormac M. Kinsella y Alexander Suh, de la Universidad de Uppsala en Suecia, y varios colaboradores, entre ellos Francisco J. Ruiz-Ruano, Josefa Cabrero y Juan P. M. Camacho, de la Universidad de Granada, descubrieron que el GRC del diamante cebra contiene al menos 115 genes, entre ellos algunos que fabrican proteínas y ARN en los ovarios y testículos de las aves adultas. Este patrón de expresión indica que es posible que estos genes ayuden a guiar el desarrollo de los espermatozoides y de los óvulos. Otros genes del GRC del diamante cebra son equiparables a los genes que, gracias a los estudios con ratones, se sabe que están implicados en el desarrollo embrionario temprano.

Para Borodin y Larkin, esos hallazgos sugieren que el GRC puede haber facilitado a las aves canoras la elusión de restricciones evolutivas fundamentales. «El genoma de las aves en general es muy compacto y conservado en comparación con, por ejemplo, el de los mamíferos», explica Larkin. Los genomas de los ma-

míferos actuales varían en tamaño (pesan desde menos de 2 picogramos a más de 8) y están empaquetados en cualquier número entre seis y 102 cromosomas. En las decenas de millones de años que llevan evolucionando, sus cromosomas han sido cortados y troceados, reorganizados y unidos de nuevo muchas veces. Estas reestructuraciones han alterado la expresión génica en formas que han producido diversos rasgos. En cambio, las aves poseen genomas que pesan desde solo un poco menos de 1 picogramo a un poco más de 2. Y, por regla general, tienen alrededor de unos 80 cromosomas. Además, contienen muy poco ADN «basura» en comparación con la cantidad que se encuentra en la mayoría de los mamíferos.

Según suponen algunos expertos, la razón por la que los genomas de las aves son de pequeño tamaño y están optimizados tiene que ver con el vuelo. Volar es una actividad energéticamente cara. Los genomas más grandes requieren células más grandes, y ambos son más costosos metabólicamente que sus homólogos más pequeños. La intensa demanda metabólica que supone el hecho de volar puede haber limitado el tamaño del genoma de las aves. Dado que el GRC aparece solo en las células de la línea germinal y no en las mucho más numerosas células somáticas, podría haber proporcionado a las aves canoras un extraño pedazo de ADN extra, lo que habría posibilitado la evolución de nuevos rasgos, sin los costes metabólicos asociados con tener un genoma somático más grande.

«Las aves necesitan copias adicionales de genes específicos en las células germinales durante un período de reproducción muy corto solo para producir muchos espermatozoides y cargar los óvulos con grandes cantidades de proteínas. No tienen necesidad de portar esos genes durante todo el año y en el resto de las células del cuerpo en momentos y lugares en los que no tienen utilidad alguna», explica Borodin. Si las aves canoras encontraron una forma de obtener genes adicionales de forma temporal y que pudieran funcionar durante las primeras etapas del desarrollo a la vez que mantenían su genoma básico intacto, añade Larkin, dicha estructuración sería tremendamente ventajosa y podría explicar la gran variedad observada en las aves canoras en comparación con otros grupos de aves.

En teoría, el GRC podría haber creado el aislamiento reproductivo necesario para que evolucionara una nueva especie haciendo que esos individuos que portaban el cromosoma extra no pudieran entrecruzarse y producir descendencia fértil con aquellos que no lo tenían. Una vez que se originó el GRC en el último antepasado común de las aves canoras, los miembros de esa especie ancestral portadora del GRC pudieron producir descendencia fértil solo con parejas que también contenían el GRC. A medida que el GRC iba evolucionando, adquiriendo nuevos genes, las aves canoras que poseían una variante particular del GRC podían generar descendencia fértil solo con parejas que portaban esa misma variante.

¿Un motor de cambio?

Según Borodin y Larkin, el descubrimiento de la extensa presencia del GRC en las aves canoras y su ausencia en otras aves encaja con los resultados de otro estudio anterior. En abril del año pasado, Carl Oliveros, de la Universidad Estatal de Luisiana, y sus colegas presentaron los resultados de su análisis de ADN de docenas de miembros del orden de aves (Paseriformes) al que pertenecen las aves canoras y otros grupos que cuentan con muchas menos especies. Basándose en las secuencias de ADN y en un puñado de fósiles de edad conocida, el equipo reconstruyó el modo en que estaban relacionadas las diversas familias de paseriformes y el momento en que se bifurcaron. Luego compararon esta línea temporal de diversificación con los registros climáticos y geológicos para ver si las tendencias de diversificación de los paseriformes se correlacionaban con algunos sucesos de la historia de la Tierra, como predecían algunas hipótesis. En líneas generales, las fluctuaciones en el ritmo de la diversificación de estas aves no se podían relacionar con los cambios en la temperatura global o con la dispersión de las aves hacia nuevos continentes. Los hallazgos llevaron a los autores a sugerir que otros mecanismos mucho más complejos que la temperatura o la oportunidad ecológica fueron los principales impulsores de la especiación de los paseriformes. «Estas conclusiones están muy en línea con nuestra hipótesis de la contribución del GRC a la diversificación de las aves canoras», afirma Larkin.

Sin embargo, no todo el mundo está preparado para aceptar que el GRC promovió la diversificación de las aves canoras. «En general, es difícil establecer una causación entre cualquier rasgo dado, como la presencia del GRC, y el éxito evolutivo de un grupo particular», apunta Oliveros. «La presencia del rasgo podría haber coincidido por causalidad con otro rasgo (por ejemplo, un comportamiento de anidación) que podría haber desempeñado un papel importante en el éxito evolutivo de un grupo.»

Pero otros investigadores que no han participado en los nuevos estudios encuentran esta idea intrigante. «El hecho de que los GRC se hayan mantenido durante largos períodos evolutivos y que también contengan genes supuestamente funcionales [...] sugiere que podrían desempeñar un papel en el aislamiento reproductivo de las aves», comenta David Toews, de la Universidad Estatal de Pensilvania. Si la enorme tasa de diversificación de las aves canoras en comparación con el de otras aves fue facilitada por un mecanismo genómico como el GRC, «sería algo excitante e inesperado para mí», dice Toews. Aunque advierte que «necesitamos saber más sobre qué es lo que hace realmente para establecer ese vínculo con confianza».

El trabajo podría ayudar a comprender otros organismos, más allá de las aves. «Creíamos que sabíamos mucho sobre cómo estaban organizados los genomas de las aves», reflexiona Suh, «pero hemos tenido el GRC delante de nosotros y aun así nos había pasado por alto». Los científicos han encontrado cromosomas extra parecidos en los mixinos (una clase de peces) y en algunos insectos. Suh se pregunta si el GRC está más presente en el árbol de la vida: «Los hallazgos en las aves canoras abren un conjunto de nuevas direcciones en las que reflexionar sobre evolución y desarrollo».

Kate Wong *es redactora de* Scientific American *especializada en evolución y ecología.*

PARA SABER MÁS

Programmed DNA elimination of germline development genes in songbirds. Cormac M. Kinsella et al. Depositado en el repositorio *Biorxiv*, 22 de diciembre de 2018. **www.biorxiv.org/content/10.110¼44364v2**

Germline-restricted chromosome is widespread among songbirds. Anna Torgasheva et al. en *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*, vol. 116, n.º 24, págs. 11.845-11.850, 11 de junio de 2019.

EN NUESTRO ARCHIVO

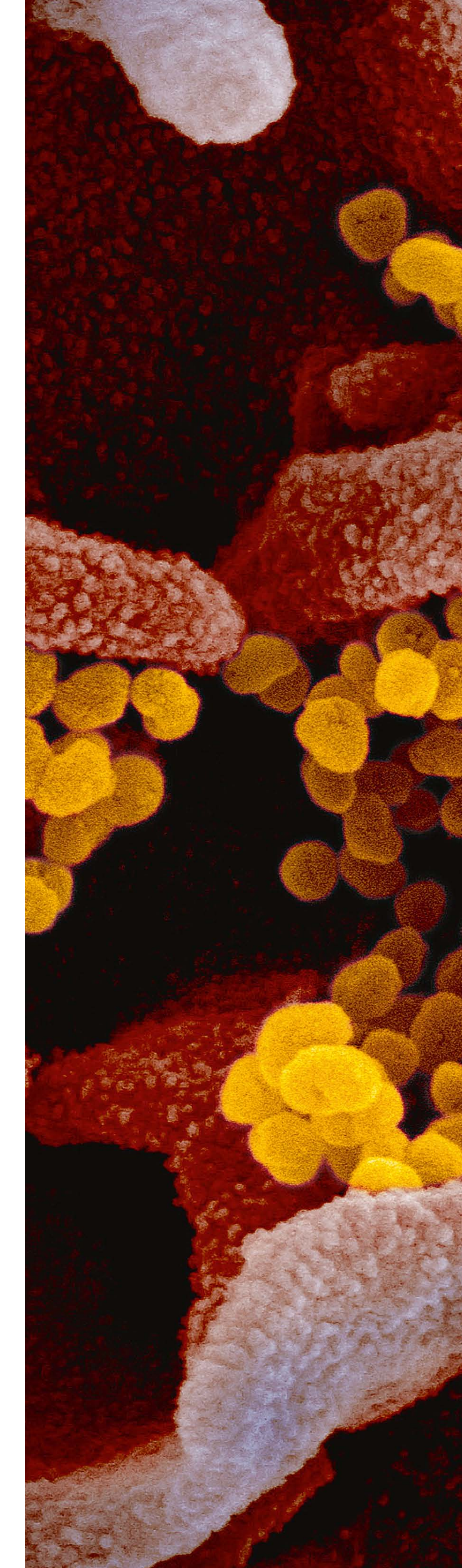
Origen y evolución de las aves. Stephen Brusatte en *IyC*, marzo de 2017.

SALUD PÚBLICA

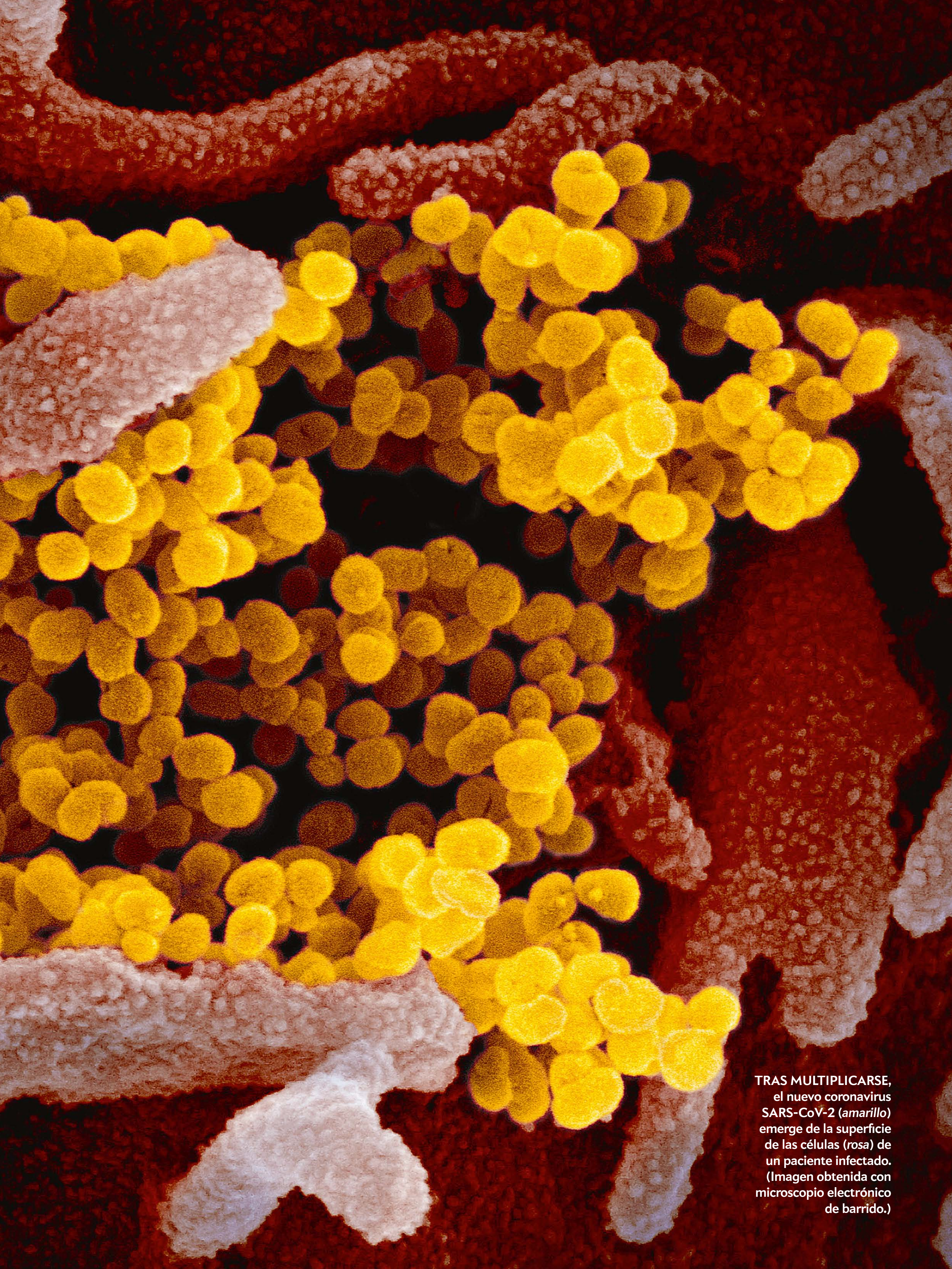
La carrera contrarreloj frente al nuevo coronavirus

Investigadores de todo el mundo buscan vacunas y tratamientos que frenen la propagación del SARS-CoV-19

Marta Consuegra Fernández



El pasado mes de enero, el Centro Nacional de Microbiología confirmaba el primer caso en España de infección por SARS-CoV-2, popularmente conocido como coronavirus de Wuhan. Desde su primera detección en China a finales de diciembre de 2019, el virus se ha propagado a distintos lugares del mundo más allá del continente asiático, entre otros países, Australia, Estados Unidos, Canadá, Japón, Emiratos Árabes, Francia, Finlandia, Alemania, Italia y España. El ascenso acelerado del número de contagios ha llevado a la Organización Mundial de la Salud a declarar el brote como una emergencia sanitaria internacional y, desde el 11 de marzo, como una pandemia. Esta situación extraordinaria recuerda brotes previos, como el de la gripe H1N1, el ébola o el zika, para los que también se declaró alerta mundial.



TRAS MULTIPLICARSE, el nuevo coronavirus SARS-CoV-2 (*amarillo*) emerge de la superficie de las células (*rosa*) de un paciente infectado. (Imagen obtenida con microscopio electrónico de barrido.)



Marta Consuegra Fernández, doctora en biomedicina, es investigadora, redactora científica y profesora del máster de Comunicación Especializada en la Facultad de Filología y Comunicación de la Universidad de Barcelona.

Sin embargo, la comunidad sanitaria pide a la ciudadanía que el estado de emergencia se interprete con moderación; pese al elevado número de contagios (al cierre de la presente edición, se han detectado más de 220.000 infectados en todo el mundo y más de 17.000 en España), los datos apuntan a una baja letalidad del virus (alrededor del 3 por ciento), que afecta en especial a personas vulnerables con el sistema inmunitario deprimido.

La medida de alerta pretende promover una coordinación sanitaria global que dé apoyo sobre todo a los países menos desarrollados y hace un llamamiento a los científicos para que busquen posibles tratamientos y vacunas. Numerosos centros de investigación de todo el mundo están trabajando en distintas estrategias terapéuticas. Se prevé que algunas podrán empezar a ensayarse en humanos en los próximos meses. En España, los grupos del Centro de Investigación en Sanidad Animal (CReSA) del IRTA, en Barcelona, y el Centro Nacional de Biotecnología (CNB) del CSIC, en Madrid, se han sumado a la lucha contra el SARS-CoV-2.

Pero ¿cuál es el conocimiento que se tiene hoy del virus? ¿Qué estrategias se están abordando para hallar vacunas y tratamientos contra la infección? ¿En qué estado de desarrollo se encuentran?

EL NUEVO CORONAVIRUS

El SARS-CoV-2 pertenece a una amplia familia de virus descritos por primera vez en los años sesenta del siglo pasado y que son responsables de varias afecciones respiratorias humanas, (el resfriado común, la bronquitis y la neumonía) y de algunos trastornos digestivos. Se trata de virus clásicos formados por una hebra de ARN envuelta por una estructura proteica que recuerda a la forma de la corona solar. Pueden infectar tanto a animales como a personas. De hecho, se sabe que el nuevo coronavirus es de origen animal y el brote inicial se sitúa en un mercado de mariscos de Wuhan. Aunque todavía no se ha identificado la especie animal de la que procede, sí se ha confirmado que puede transmitirse tanto de animal a persona (lo que se conoce como zoonosis) como de persona a persona, en este último caso, a través de las vías aéreas.

Existen antecedentes de otros dos coronavirus zoonóticos que, como el SARS-CoV-2, han causado infecciones graves e incluso mortalidad. Uno de ellos es el coronavirus del síndrome respiratorio agudo grave (SARS-CoV), detectado por primera vez en China el año 2002. Se propagó a más de treinta países y causó una enfermedad respiratoria aguda que en ocasiones derivó en una insuficiencia respiratoria grave. Se le asoció una letalidad de entre el 10 y el 11 por ciento. Aunque la enfermedad todavía no se considera erradicada, el brote cedió en 2004 y actualmente no hay registros de personas afectadas.

Diez años más tarde, apareció en Arabia Saudí el coronavirus causante del síndrome respiratorio de Oriente Medio (MERS-CoV). Esta infección también ocasiona dificultades respiratorias que pueden derivar en neumonía y, en los casos más graves, provocar la muerte. Asimismo, se le asocian síntomas gastrointestinales, como diarrea. Su letalidad es elevada, del 35 por ciento, aunque la cifra podría estar sobreestimada dado que un gran número de personas infectadas no presentan ningún síntoma.

Actualmente, todavía no se ha autorizado una vacuna para ninguno de esos dos coronavirus. Los investigadores continúan buscándolas, sobre todo para el MERS-CoV, dada su alta mortalidad. De momento, hay tres vacunas que se encuentran en las fases I y II de los ensayos clínicos, en los que se evalúan la seguridad de la vacuna y la respuesta del sistema inmunitario humano.

Muchos de los conocimientos adquiridos en los brotes de SARS-CoV y MERS-CoV suponen un punto de partida importante para el diagnóstico y el desarrollo de terapias y vacunas contra el nuevo coronavirus. De hecho, este guarda una similitud genética del 80 por ciento con el SARS-CoV. Uno de los descubrimientos más relevantes sobre los coronavirus es que todos comparten una proteína conocida como espícula, o «S». Esta parece ser crucial en la infección, ya que le permite al virus acoplarse y fijarse a la superficie de las células que ataca, lo cual facilita su entrada en ellas. Según se ha observado, la proteína S se sitúa en la superficie de la envoltura del virus y parece ser clave a la hora de desencadenar la respuesta de nuestro sistema inmunitario. Este hecho la erige como una de las posibles dianas terapéuticas más importantes.

ESTRATEGIAS DE VACUNACIÓN

Desde que investigadores del Centro Clínico de Salud Pública de Shanghái publicaran la secuencia completa del virus el pasado 10 de enero, organismos públicos y privados de todo el mundo han invertido grandes cantidades de dinero en el desarrollo de una vacuna. Las estrategias para conseguirlo son variadas, pero todas buscan generar inmunidad en el huésped humano mediante la inyección de una proteína vírica, de una parte del material genético del virus (ADN o ARN) o del propio virus atenuado. Como respuesta, las células del sistema inmunitario generan anticuerpos que reconocen estructuras víricas concretas y que, por tanto, pueden hacer frente a una infección futura.

La Coalición para las Innovaciones en Preparación para Epidemias (CEPI), organismo internacional con sede en Noruega cuya misión es acelerar el desarrollo de vacunas contra infecciones emergentes, está financiando en la actualidad tres

EN SÍNTESIS

La investigación para hallar una vacuna o tratamiento contra el nuevo coronavirus, SARS-CoV-2, se apoya en gran medida en el conocimiento que se tiene de otros virus de la misma familia, como SARS-CoV y MERS-Cov, que han sido responsables de epidemias anteriores.

En una carrera frenética, se están estudiando cuáles de las moléculas o mecanismos de infección del SARS-CoV-2 pueden constituir dianas terapéuticas de interés. Entre ellas destaca la proteína S, que le permite al virus acoplarse y fijarse a la superficie de las células que ataca.

Puesto que es probable que en el futuro surjan periódicamente nuevos coronavirus, debería invertirse en el desarrollo de vacunas que puedan reconocer todos los virus de esta familia e inmunizarnos frente a brotes venideros.

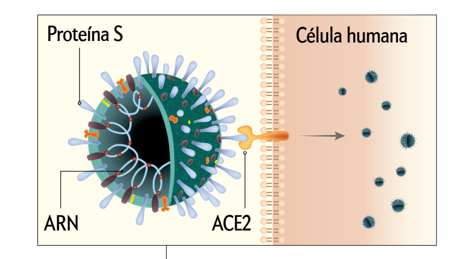
PÁGINA ANTERIOR: INSTITUTO NACIONAL DE ALERGIAS Y ENFERMEDADES INFECCIOSAS DE EE.UU., LABORATORIO ROCKY MOUNTAIN

La búsqueda de vacunas y tratamientos

En su esfuerzo por prevenir y tratar la infección por el SARS-CoV-2, los científicos intentan descifrar primero las características específicas del nuevo virus y los mecanismos de los que se sirve para atacar a las células humanas. Hasta ahora, las estrategias que se están usando para el desarrollo de una vacuna incluyen secuencias peptídicas, ADN, ARN o el mismo virus atenuado. De forma simultánea, se han iniciado ensayos clínicos para comprobar la eficacia de diferentes fármacos y se valora también el uso de antisueros y anticuerpos.

CONOCER AL ENEMIGO

El virus consta de ARN envuelto por una cápside, formada por diversas proteínas. Las vacunas y los tratamientos se centran en las moléculas que pueden ejercer un papel clave en la infección. Una de las más importantes es la proteína S, que utiliza el receptor ACE2 de las células humanas para que el ARN del virus pueda introducirse en ellas.



VACUNAS

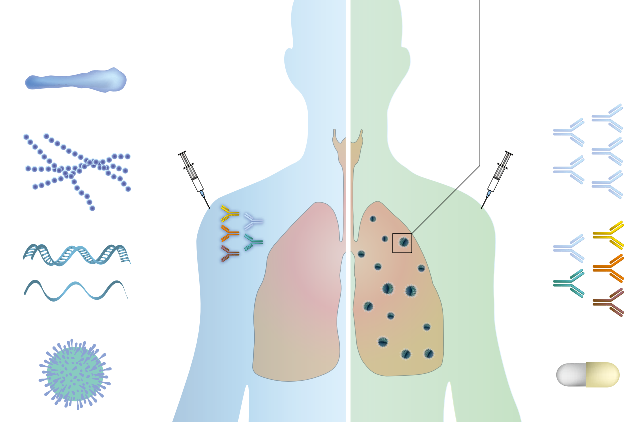
Se están investigando moléculas víricas que, una vez inyectadas en las personas, desencadenen en ellas inmunidad contra futuros ataques del virus.

Antígenos
Partículas específicas del virus, como la proteína S.

Péptidos
Secuencias proteicas, como el dominio de la proteína S que reconoce el receptor celular ACE2.

Material genético
ADN o ARN que codifica una proteína del propio virus.

Virus atenuado
El virus se modifica genéticamente para que resulte inocuo para el organismo.



TRATAMIENTOS

Se están ensayando anticuerpos y fármacos que, tras administrarse al paciente, ataquen directamente al virus.

Anticuerpos monoclonales
Se generan en el laboratorio para que reconozcan una molécula específica del virus (como la proteína S).

Anticuerpos policlonales
Se obtienen del antisuero (suero con anticuerpos) de un individuo infectado. Reconocen múltiples moléculas del virus.

Tratamiento farmacológico
Principalmente antivíricos, como el remdesivir, pero también el ibuprofeno.

MARTA CONSUEGRA

programas de investigación. El primero, liderado por el Instituto Nacional de Alergias y Enfermedades Infecciosas de EE.UU. (NIAID), en colaboración con la empresa biotecnológica Moderna, está diseñando vacunas compuestas por secuencias víricas de ARN mensajero (ARNm). El segundo, llevado a cabo por la empresa farmacéutica Inovio, de EE.UU, se centra en vacunas compuestas por secuencias específicas de ADN. Y en el tercero, un equipo de la Universidad de Queensland está intentando fabricar una vacuna a partir de proteínas víricas obtenidas de cultivos celulares.

Además de esas iniciativas, otras compañías, como Johnson & Johnson y Drugmaker Novavax, o el mismo Hospital del Este de Shanghái, afiliado a la Universidad de Tongji, en colaboración con la compañía china Stermirna Therapeutics, han anunciado que se suman a la investigación de vacunas contra el SARS-CoV-2.

En España, el equipo dirigido por Luis Enjuanes, del CNB, en colaboración con la Escuela de Medicina Icahn del Hospital Monte Sinaí, en Nueva York, intenta obtener una vacuna a partir del virus atenuado. El grupo de Enjuanes ya había investigado con anterioridad los genomas de SARS-CoV y MERS-CoV, hecho que les ha ayudado hace poco a identificar los genes responsables de la virulencia del nuevo coronavirus. Desde entonces, su objetivo consiste en emplear la ingeniería genética para eliminar estos genes y crear así virus atenuados. Estas nuevas versiones resultarían inocuas, por lo que podrían administrarse a humanos para estimular su sistema inmunitario.

Además del CNB, el grupo liderado por Joaquim Segalés, del CReSa y de la Universidad Autónoma de Barcelona, trabaja junto con científicos del Laboratorio Nacional de Galveston, en Texas, y del Centro Médico de la Universidad de Texas para buscar estrategias contra el SARS-CoV-2. Esta colaboración ha dado fruto a un primer artículo publicado en la revista *F1000Research*.

«La metodología que hemos usado es *in silico*. Esta se basa en realizar simulaciones computacionales para predecir qué compuestos nos podrían ayudar a prevenir o tratar la infección», ha explicado a *Investigación y Ciencia* Júlia Vergara, investigadora del CReSa involucrada en este estudio.

Los autores han comparado secuencias de las proteínas víricas (deducidas a partir de los datos del genoma del virus) con secuencias de proteínas humana para predecir posibles interacciones entre ellas e identificar cuáles desempeñan un papel relevante en la infección. Basándose en el conocimiento previo de que el SARS-CoV se introducía en las células mediante la unión de la proteína S con el receptor de membrana ACE2 (enzima convertidora de la angiotensina 2), han analizado si la proteína S del nuevo virus también se uniría a este receptor. No solo han descubierto que sí lo hace, sino que, además, han

localizado una secuencia de la subunidad S1 de la proteína S que se une al receptor ACE2 con mayor afinidad. Ello indica que este dominio de la proteína S podría convertirse en una buena diana terapéutica. Los autores quieren ahora desarrollar vacunas a base de secuencias proteicas (péptidos) correspondientes al dominio de S1 recién descubierto para que el organismo humano genere anticuerpos que impidan estas uniones.

En esta misma línea, tres estudios simultáneos han corroborado la interacción de la proteína S del SARS-CoV-2 con el receptor ACE2, tanto por medios informáticos como mediante cultivos celulares. En uno de ellos, Markus Hoffmann, del Instituto Leibniz para la Investigación de Primates, en Gotinga, y sus colaboradores sugieren además otras posibles dianas terapéuticas, como la proteasa TMPRSS2, que también parece facilitar la entrada del virus a la célula.

Es muy probable que surjan más coronavirus en el futuro, más o menos en intervalos de diez años, como ha ido sucediendo hasta ahora con otros virus de esta familia

En esta frenética carrera contrarreloj, un grupo de la Universidad de Texas liderado por Jason McLellan acaba de publicar la estructura cristalizada de la proteína S del SARS-CoV-2. Este avance permite identificar las partes de la proteína S que están más expuestas y que, por tanto, son más accesibles a la hora de atacar el virus, por ejemplo, con anticuerpos.

Los métodos *in silico* se consideran herramientas muy útiles para generar primeras hipótesis en un plazo especialmente corto. Los datos obtenidos con ellos, combinados con los derivados de los ensayos in vitro y de la reciente cristalización de la proteína S, ofrecen la posibilidad de realizar un análisis integrado con datos de distintas procedencias, lo que ayuda a afinar la investigación de nuevas dianas terapéuticas.

Vergara ha explicado que, una vez identificados computacionalmente los compuestos que podrían prevenir la infección, deben realizarse los estudios preclínicos y validar, sobre todo en modelos animales, la funcionalidad y la efectividad de las predicciones *in silico*. La experta ha apuntado que centrarán sus estudios en la proteína S y en la actina (aunque están pendientes de la aprobación de financiación para continuar la investigación).

«Somos muchos los que estamos sumando esfuerzos para investigar el SARS-CoV-2. Algunos grupos han anunciado que en veinte meses, o incluso en cuarenta días, podría haber una vacuna comercializada. Esto es prácticamente imposible», ha señalado Vergara. «Este año puede que se consiga una primera vacuna experimental. Ahora bien, tendrá que someterse a los distintos estudios de seguridad, y eso lleva años.»

EN BUSCA DE TRATAMIENTOS

No cabe duda de que el desarrollo de una vacuna que evitara la infección y la propagación del virus es la manera más eficiente de detener el brote. Sin embargo, y dado que su desarrollo es lento y complejo, los científicos también investigan posibles terapias para las personas infectadas. «La Unión Europea está más interesada ahora en el tratamiento de la infección», ha afirmado Vergara. «De hecho, nosotros vamos a desarrollar también anticuerpos como medida terapéutica para bloquear la acción del virus en los pacientes.»

Actualmente, no existe ningún tratamiento para el SARS-CoV-2 más allá del cuidado sanitario para paliar los síntomas o el soporte vital en los casos más graves. No obstante, se están estudiando varios fármacos antivíricos autorizados para otras enfermedades, como la cloroquina (contra el paludismo) o el lopinavir (contra el VIH). El NIAID está explorando el empleo de remdesivir, desarrollado inicialmente para tratar pacientes de ébola y que ha resultado beneficioso en animales de laboratorio infectados con el SARS-CoV-2. Según *The New England Journal of Medicine*, el primer paciente infectado de Estados Unidos ha mejorado su estado de salud gracias a la administración intravenosa de remdesivir. Motivados por este estudio, en China han comenzado varios ensayos para evaluar la eficacia de esos antivíricos en pacientes; los resultados podrían publicarse a finales de este mes de abril.

Por su parte, el trabajo publicado por Segalés sugiere que un conocido fármaco, el ibuprofeno, podría ejercer actividad antivírica en los infectados, como ya se observó en los pacientes de ébola. Según los estudios de predicción bioinformática llevados a cabo por los investigadores, este fármaco se uniría a la actina, una proteína que forma parte del «esqueleto» celular y del que se sirve el SARS-CoV-2 para introducirse en la célula. A falta de corroborar estas afirmaciones con otros estudios preclínicos, los autores sugieren que la administración del ibuprofeno podría evitar de manera indirecta que la actina fuera utilizada por el virus.

Teniendo en cuenta que este tipo de epidemias surgen periódicamente, cabe plantearse cómo deberían de abordarse en el futuro. Se trata del tercer brote de esta familia de virus que ha sucedido en los últimos veinte años. «Es difícil prever exactamente el momento y el lugar en el que aparecerá un nuevo brote. Pero sí es muy probable que surjan más coronavirus en el futuro, más o menos en intervalos de diez años, como ha ido sucediendo con el SARS-CoV, el MERS-CoV y el SARS-CoV-2», ha apuntado Vergara.

Dada la elevada similitud genética de estos virus, los investigadores creen que debería invertirse en el desarrollo de vacunas que puedan reconocer distintos coronavirus e incluso inmunizarnos frente a futuros brotes de virus de la misma familia. Esta medida, junto con la mejora de los protocolos de supervisión de humanos y animales, podría evitar situaciones de gravedad como la que estamos viviendo actualmente. IyC

PARA SABER MÁS

Use of the informational spectrum methodology for rapid biological analysis of the novel coronavirus 2019-nCoV: prediction of potential receptor, natural reservoir, tropism and therapeutic/vaccine target. Veljko Veljkovic et al. en *F1000Research* (pendiente de revisión externa), publicado en línea el 27 de enero de 2020.

A new coronavirus associated with human respiratory disease in China. Fan Wu et al. en *Nature* (pendiente de revisión externa), publicado en línea el 3 de febrero de 2020.

Epidemiological and clinical characteristics of 99 cases of 2019 novel coronavirus pneumonia in Wuhan, China: a descriptive study. Nanshan Chen et al. en *The Lancet*, vol. 395, n.º 10.223, págs. 507-513, 15 de febrero de 2020.

EN NUESTRO ARCHIVO

Prever la próxima pandemia. Alessandro Vespignani en *IyC*, julio de 2018.



NEUROCIENCIA

EL MAPA SOCIAL DEL CEREBRO

Los circuitos neuronales que controlan nuestra ubicación en el espacio y el tiempo desempeñarían un papel vital en cómo nos relacionamos con los demás

Matthew Schafer y Daniela Schiller

Ilustración de Richard Borge

Se nos suele decir que no hay atajos en la vida. Pero hasta el cerebro de una rata está organizado de tal modo que ignora por completo ese tipo de consejos. De hecho, es la máquina de buscar atajos personificada.

El primer indicio de su capacidad para dar con caminos alternativos fue descrito en 1948 por Edward Tolman, de la Universidad de California en Berkeley. En un curioso experimento concebido por él, una rata hambrienta corría a través de una mesa circular hacia un pasillo angosto y oscuro. Giraba a la izquierda, luego a la derecha y de nuevo a la derecha, se escabullía hacia el otro extremo de un corredor estrecho iluminado donde, al fin, la esperaba un recipiente con comida. No había dónde elegir. El roedor solo podía seguir la única ruta sinuosa disponible, y así lo hizo, una vez tras otra, durante cuatro días.

Al quinto, cuando se encaminó por enésima vez hacia el pasillo, se topó con una pared: la ruta estaba cortada. Volvió a la mesa circular y comenzó a buscar alternativas. De repente, esta también se había transformado: en lugar de un camino, ahora había 18 rutas radiales que partían de los bordes. Tras aventurarse unos pasos por algunas, finalmente optó por recorrer íntegramente la sexta, la única que conducía a la comida.

Tomar el camino directo al recipiente de comida a la primera podría parecer trivial, pero en su momento, desde la perspectiva de los psicólogos conductistas, la capacidad de orientación de la rata era una proeza remarcable. La corriente principal del aprendizaje animal en esa época creía que la conducta demostrada por la rata en el laberinto era un tema de simples asociaciones estímulo-respuesta. Cuando los estímulos ambientales suelen derivar casi siempre en una respuesta acertada, las conexiones neuronales que codifican esa asociación se refuerzan.

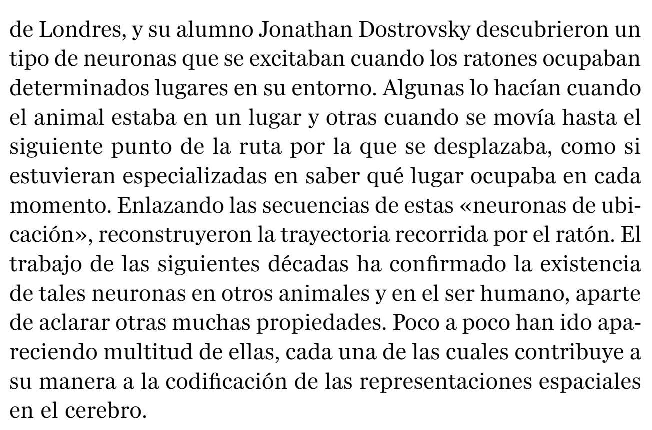
Desde esta visión, el cerebro opera como una centralita telefónica que mantiene solo las conexiones que son fiables entre las llamadas entrantes de nuestros órganos sensoriales y los mensajes salientes destinados a los músculos. Pero la centralita conductual no explicaba la habilidad de dar con un atajo de buenas a primeras, sin haber recorrido esa ruta concreta. Esa y otras muchas observaciones intrigantes en esta línea respaldaron a la escuela de pensamiento rival, promulgada por quienes creen que en el curso del aprendizaje la rata crea un mapa en su cerebro. Tolman, defensor de esa escuela, acuñó el término «mapa cognitivo».

Según él, el cerebro hace algo más que aprender asociaciones directas entre estímulos. En realidad, tales asociaciones suelen ser frágiles y quedan obsoletas ante cambios en el ambiente. Desde Tolman, los psicólogos hace décadas que saben que el cerebro construye, guarda y emplea mapas mentales. Estos modelos del mundo nos permiten orientarnos en el entorno pese a la complejidad y variabilidad de los ambientes, dotándonos de la flexibilidad para tomar atajos o rodeos cuando sea necesario. La rata hambrienta de Tolman tuvo que haber recordado la ubicación de la comida, deducido la distancia angular y escogido la ruta más probable que la conduciría hasta ella. En suma, tuvo que trazar un modelo del entorno.

Ese trazado, o cartografiado, trasciende el mero espacio físico. En el corazón de muchas de nuestras capacidades más «humanas» deben residir mapas mentales: la memoria, la imaginación, las deducciones, el razonamiento abstracto e incluso las dinámicas de la interacción social son algunas de ellas. Los investigadores han comenzado a explorar si tales mapas registran cómo de cerca o de lejos está un individuo de otro y qué lugar ocupa ese sujeto en la jerarquía social del grupo. ¿Cómo crea el cerebro los mapas que nos permiten abrirnos paso por el mundo?

UN MAPA ESPACIAL

Las primeras pistas sobre la base neuronal de los mapas mentales surgieron en la década de 1970. Mientras estudiaba el hipocampo de los roedores, John O'Keefe, del Colegio Universitario de Londres, y su alumno Jonathan Dostrovsky descubrieron un tipo de neuronas que se excitaban cuando los ratones ocupaban determinados lugares en su entorno. Algunas lo hacían cuando el animal estaba en un lugar y otras cuando se movía hasta el siguiente punto de la ruta por la que se desplazaba, como si estuvieran especializadas en saber qué lugar ocupaba en cada momento. Enlazando las secuencias de estas «neuronas de ubicación», reconstruyeron la trayectoria recorrida por el ratón. El trabajo de las siguientes décadas ha confirmado la existencia de tales neuronas en otros animales y en el ser humano, aparte de aclarar otras muchas propiedades. Poco a poco han ido apareciendo multitud de ellas, cada una de las cuales contribuye a su manera a la codificación de las representaciones espaciales en el cerebro.



Matthew Schafer cursa el doctorado en neurociencia en la Facultad de Medicina Icahn del Hospital Monte Sinaí. Centra su investigación en los mecanismos neuronales de la cognición social en el cerebro humano.

Daniela Schiller es profesora asociada de neurociencia y psiquiatría en la misma facultad. Investiga los mecanismos neuronales del control emocional que exige la adaptación a los constantes cambios ambientales.

En la corteza perirrinal, una región conectada con el hipocampo, un equipo dirigido por Edvard Moser y May-Britt Moser, antiguos becarios de O'Keefe, descubrió unas neuronas muy similares a las de ubicación. Estas también se activaban cuando el animal se hallaba en una ubicación específica, pero a diferencia de las primeras, cada una de las recién descubiertas se descargaba en varias posiciones regulares. Cuando se superpuso esa actividad sobre las posiciones ocupadas por el animal, los patrones de descarga de esas neuronas de retícula semejaban triángulos equiláteros muy uniformes. Como si se tratara de una métrica espacial, se excitaban cuando el animal pasaba sobre los vértices de los triángulos. El descubrimiento de ambos tipos de neuronas creó una gran expectación debido a la imagen que revelaba del control de la orientación por parte del cerebro. Las neuronas de ubicación y de retícula constituyen instrumentos para ubicarse en el espacio y determinar la dirección y la distancia, por lo que son cruciales para trazar los mapas mentales. O'Keefe y los Moser recibieron en 2014 el premio Nobel de fisiología o medicina por sus trabajos sobre ambas neuronas.

La variedad de información que resulta útil para crear un mapa así es amplia y el sistema hipocámpico-entorrinal codifica buena parte de ella. Descubrir la ubicación de una meta es un ejemplo: cuando el animal se desplaza hacia un objetivo, algunas neuronas del hipocampo se excitan en función de la dirección y de la distancia que lo separan de él. Y cuando se acerca, devienen más activas.

Otras neuronas también representan la imagen. Un grupo especializado de células de «recompensa» codifica las posiciones «gratificantes» a lo largo de diferentes entornos, proporcionando

EN SÍNTESIS

¿Cómo intuyen los atajos los animales y el ser humano cuando se mueven de un lugar a otro? En el cerebro se han descubierto mapas mentales que ayudan a trazar las mejores rutas a partir de un modelo del entorno físico.

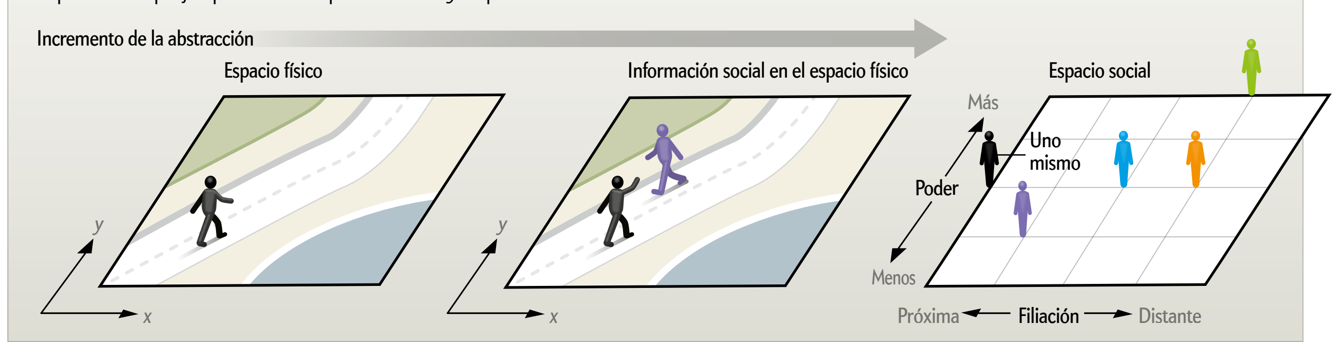
Las aptitudes cartográficas del cerebro no solo supervisan el espacio físico que ocupamos. También pueden resultar vitales en procesos mentales como la memoria, la imaginación, las deducciones y el razonamiento abstracto.

Lo más intrigante es que los mapas podrían estar involucrados en el seguimiento de la dinámica de las relaciones sociales: cómo de distantes o de cercanos están los individuos entre sí y qué lugar ocupan en la jerarquía del grupo.

CARTOGRAFÍA SOCIAL

Dando paso a lo abstracto

Los mapas simplifican el mundo sintetizando una abrumadora cantidad de datos sensoriales y cognitivos en un formato que nos permite desenvolvernos en el espacio físico, al indicarnos atajos y desvíos que nos conducen a un destino más rápidamente. La organización de tales mapas (formados a partir de la actividad de neuronas especializadas en el control del espacio y del tiempo) aumenta hasta la abstracción de lo que representan: desde el reconocimiento de otro individuo por el camino hasta incluso un espacio complejo que indica el poder social y la proximidad a otros.



FUENTE: «NAVIGATING SOCIAL SPACE», POR MATTHEW SCHAFER Y DANIELA SCHILLER, EN *NEURON*, VOL. 100, 24 DE OCTUBRE DE 2018. JEN CHRISTIANSEN (*ilustración*)

una suerte de baliza que guía al animal (piénsese en la «X» que marca el tesoro en un mapa pirata). Otras neuronas controlan la velocidad y la dirección, como velocímetros y brújulas internas que calculan el avance del animal en movimiento. Neuronas específicas que señalan la ubicación de hitos en el entorno sirven como referencias para corregir los errores en la trayectoria. Un mapa también debe tener bordes: neuronas cuya actividad aumenta cuando el animal se acerca al perímetro del mapa.

Para el ser humano, la importancia de semejante gama de neuronas parece obvia: el cerebro ha de conocer la ubicación del hogar y del trabajo, de los muros y los callejones sin salida, de la tienda favorita o del súper de la esquina. Sigue siendo un misterio cómo toda esa información se reúne en un mapa mental coherente, pero estas células parecen proveer la lista de elementos que lo componen.

El sistema hipocámpico-entorrinal es más que un cartógrafo, empero, y los mapas sirven para algo más que para saber dónde se encuentra uno. La planificación activa también recurre a ellos. Cuando una rata llega a un cruce en un laberinto que conoce, se detiene mientras las neuronas de ubicación encargadas de las diversas opciones permanecen activas con sus secuencias de descarga, como si estuviera sopesando las posibilidades.

En el ser humano los procesos no son muy distintos. Los experimentos con sujetos que se mueven en entornos virtuales, al tiempo que se captan imágenes de su cerebro por medio de la resonancia magnética funcional, muestran que la actividad del hipocampo concuerda con la de la planificación espacial, como si estuvieran estimando y planificando rutas.

La elaboración de esquemas también sucede durante el sueño: las secuencias de actividad de las células de ubicación se reactivan para repetir el pasado o simular el futuro. Sin la capacidad de simular nuevos comportamientos tendríamos que explorar multitud de opciones del mundo real antes de optar por una. Andaríamos probando constantemente y solo actuaríamos sobre observaciones directas. En suma, las simulaciones nos permiten barajar posibilidades sin la experimentación directa.

VIAJAR EN TIEMPO MENTAL

El tiempo y el espacio están indisolublemente unidos. Es difícil hablar del primero sin recurrir a una metáfora del segundo: el tiempo «pasa» y miramos «hacia» el futuro o volvemos la vista «atrás», al pasado. El mismo sistema hipocámpico-entorrinal sigue la trayectoria del movimiento a través del tiempo. El trabajo hecho en gran parte en el laboratorio del fallecido Howard Eichenbaum, de la Universidad de Boston, reveló que algunas neuronas del citado sistema codifican la cronología en la experiencia vital del animal. Las células de tiempo se activan en momentos sucesivos, pero no lo siguen como un simple reloj, sino que marcan el contexto temporal: aumentan o reducen la duración de sus descargas si una tarea se prolonga más o menos. Algunas de esas «crononeuronas» también codifican el espacio. De hecho, en el cerebro el espacio físico y el temporal pueden estar ligados.

El descubrimiento de la gran importancia de tales áreas cerebrales en la apreciación del espacio y del tiempo no fue una sorpresa absoluta. Los psicólogos hacía tiempo que sospechaban que debía ser así. En 1953, a Henry Molaison le extirparon el hipocampo en un intento de controlar las graves crisis epilépticas que padecía. De ese modo, se convirtió en uno de los casos más célebres en la historia de la neurociencia.

Podía recordar la mayoría de las experiencias anteriores a la operación: las personas que conocía y hechos de la cultura y la política. Pero después de ella perdió prácticamente toda capacidad de retentiva. Solo ciertos tipos de aprendizaje y de recuerdos permanecieron intactos y, con la práctica suficiente, podía aprender ciertas habilidades. En cambio, perdía de inmediato el recuerdo de las nuevas personas, hechos y acontecimientos que conocía en su día a día.

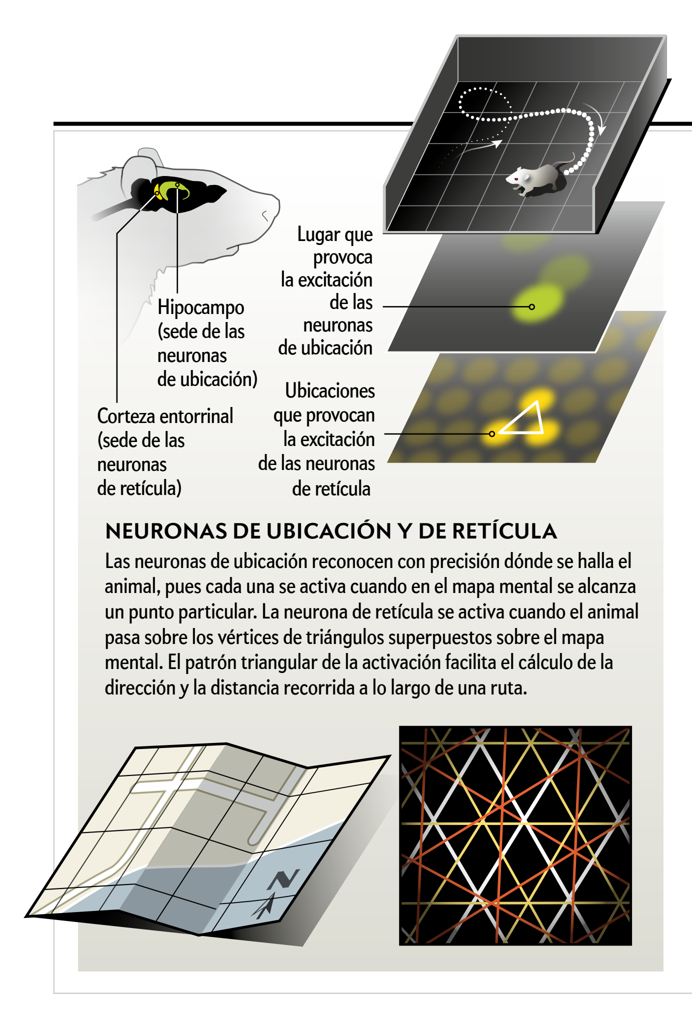
Con su estudio, los neurocientíficos se dieron cuenta de lo esencial que es el hipocampo para crear la memoria episódica que graba los hechos y los acontecimientos. La investigación sobre el cometido de esa región en la memoria episódica se disparó, en gran medida en paralelo con el estudio de sus funciones cartográficas.

Los descubrimientos sobre el papel del hipocampo y de la corteza entorrinal en la orientación espacial y la memoria episódica fueron notables por un par de razones, como mínimo. Los trabajos en roedores acerca de la orientación y del desplazamiento en el espacio suponen la primera vez en que una función cognitiva superior, más allá de los procesos sensoriales básicos, se interrela-

UN SISTEMA AMBIVALENTE

La cartografía cognitiva es física y social

El cerebro forma la idea de un amigo o de un adversario integrando diversas características sociales de recuerdos que supervisan la posición de cada uno. Las investigaciones indican que lo que recoge sería empleado para ubicar a un individuo dentro de una jerarquía social que dilucida, en principio, dónde se sitúa cada uno en relación con los demás.



NEURONAS DE UBICACIÓN Y DE RETÍCULA

Las neuronas de ubicación reconocen con precisión dónde se halla el animal, pues cada una se activa cuando en el mapa mental se alcanza un punto particular. La neurona de retícula se activa cuando el animal pasa sobre los vértices de triángulos superpuestos sobre el mapa mental. El patrón triangular de la activación facilita el cálculo de la dirección y la distancia recorrida a lo largo de una ruta.

EL SALTO A LOS MAPAS SOCIALES

Tuerza a la derecha en la esquina y continúe hasta su destino. Dibujar un mapa del entorno físico es tarea de las neuronas de ubicación y las de retícula. Pero el cerebro también podría recurrir a ellas para trazar mapas del medio social: ubicar a un conocido que gana en proximidad pero pierde poder en una relación, por ejemplo.

Orientación física
y
x

Orientación social
Más
Poder
Menos
Uno mismo
Próxima
Filiación
Distante

cionaba claramente con redes y mecanismos neuronales. Molaison nos mostró que varios sistemas neuronales soportaban numerosos tipos de memoria, al menos en parte. El hipocampo desempeñaba un papel central en la formación y el almacenamiento de nuevos recuerdos episódicos. Estos descubrimientos apuntaban a que los mecanismos de localización espacial y temporal podrían estar detrás de la memoria episódica. Esta síntesis quizá quede mejor explicada con la teoría propuesta hace décadas por Tolman; ambas, la memoria episódica y la localización espacial, reflejarían la formación y el uso de mapas cognitivos cerebrales.

Un mapa no es un retrato fiel del mundo en toda su complejidad, sino una representación de las relaciones: distancias y direcciones entre nuestra posición en ese momento y lo que existe en cada lugar. Reduce una vasta cantidad de información del mundo real a un formato simple y legible que nos dota de flexibilidad y capacidad de decisión en nuestros desplazamientos. Los citados tipos de neuronas (de ubicación, de retícula y de borde, etc.) integran esos elementos afines en un mapa mental, al que otras regiones cerebrales darán lectura para orientar nuestros desplazamientos, lo que equivale a una toma de decisión adaptativa. El cartografiado permite inferir relaciones, aunque uno no las haya experimentado. También permite plantear atajos mentales que van más allá de la dimensión espaciotemporal, hasta el punto de que el razonamiento abstracto podría depender de algunos de esos mismos mecanismos neuronales.

En un ejemplo de esta nueva línea de trabajo, Alexandra Constantinescu, Jill O'Reilly y Timothy Behrens, de la Universidad de Oxford, pidieron a unos voluntarios que aprendieran asociaciones de símbolos con dibujos de pájaros de «palo», con cuello y patas de longitud dispar. Uno cuellilargo y paticorto, por ejemplo, podía estar vinculado con la imagen de una campana, en tanto que otro cuellicorto y patilargo podía estarlo con un peluche. Estas conexiones creaban un espacio de asociación bidimensional. Pese a que las neuroimágenes carecen de la resolución para detectar las neuronas de retícula en el cerebro, las captadas al poner a prueba las asociaciones aprendidas revelaron un patrón de activación reticular en la corteza entorrinal.

Este hallazgo se basa en el trabajo de Christian Doeller, del Instituto Max Planck de Cognición Humana y Neurociencia en Leipzig, y de Neil Burgess, del Colegio Universitario de Londres, que mostró por primera vez una representación reticular entorrinal en personas que se movían por un laberinto virtual. En ambas relaciones, la física y la abstracta, la organización reticular es sumamente eficaz. Hace más predecibles los vínculos entre los lugares y los conceptos, poniendo de relieve lo rápido que se pueden hacer inferencias sobre estas relaciones. Al igual que en el espacio físico, esta organización de la información permite encontrar atajos —las relaciones entre ideas o quizás analogías, los estereotipos e incluso algunos aspectos de la creatividad en sí misma podrían depender de tales inferencias—.

MAPAS DE GENTE

La progresión de lo físico a lo abstracto nos lleva al modo en que el cerebro representa las relaciones sociales. De retazos de conocimiento sobre otra persona se extrae el concepto que uno tiene de ella. Cuando vemos la foto o escuchamos o leemos el nombre de esa persona, se activan las mismas neuronas del hipocampo, sin tener en cuenta los detalles sensoriales del estímulo (por ejemplo, la famosa «neurona de Jennifer Aniston» descrita por Itzhak Fried de la Universidad de California en Los Ángeles, y sus co-

FUENTES: «SCIENTIFIC BACKGROUND: THE BRAIN'S NAVIGATIONAL PLACE AND GRID CELL SYSTEM», POR OLEKIEHN Y HANS FORSSBERG, CON ILUSTRACIONES DE MATTIAS KARLEN. NOBELPRIZE.ORG; «NAVIGATING SOCIAL SPACE», POR MATTHEW SCHAFER Y DANIELA SCHILLER, EN *NEURON*, VOL. 100, 24 DE OCTUBRE DE 2018. JEN CHRISTIANSEN (*ilustración*)

legas). Estas neuronas hipocampales son las encargadas de representar conceptos de individuos concretos.

Otras células del hipocampo rastrean la ubicación física de otros y por eso se las llama de posición social. En un experimento de David Omer de la Universidad Hebrea de Jerusalén, Nachum Ulanovsky del Instituto Weizmann de Ciencia en Rehovot, y su equipo, unos murciélagos observaron cómo otros se desplazaban por un laberinto sencillo en busca de una recompensa. La tarea del observador consistía sin más en mirar y aprender del que volaba; después podría seguir la misma ruta para conseguir el premio. Cuando miraba, sus células del hipocampo se activaban según la localización del congénere en vuelo.

Los circuitos neuronales de ciertas subregiones hipocampales, en concreto de la CA1 y la CA2, contribuyen a tales recuerdos sociales. La estimulación o la inhibición deliberada de esas áreas incrementa o disminuye la habilidad del animal para reconocer a otros animales. En el ser humano las lesiones del hipocampo no suelen afectar a la memoria facial, pero la relación entre ese identificador básico que es la cara y la conducta del individuo en cuestión puede perderse. Esa observación sugiere que el hipocampo no graba simplemente una cara u otros detalles personales, sino que relaciona entre sí características sociales.

La actividad hipocampal también revisa las jerarquías sociales: las peticiones del jefe y las de un compañero pueden ser valoradas de modo distinto y otorgar diferente posición social. Las metáforas comunes ilustran la dimensión espacial de la jerarquía: uno puede intentar ganar estatus «trepando por la escala social» o «mirar por encima del hombro» a alguien que esté por debajo. Otros factores son también críticos. La afinidad biológica, compartir las mismas metas colectivas, el recuerdo de los favores y desaires, todo determina la proximidad o la distancia social. Es posible concebir las relaciones humanas como coordenadas geométricas en el espacio social que quedan definidas por las dimensiones de jerarquía y de filiación.

El trabajo en nuestro laboratorio ha explorado esas ideas en los últimos años. Nuestros resultados indican que, como con otros espacios, el hipocampo organiza la información social en un formato de mapa. Para someter a prueba esta hipótesis, pusimos a sujetos experimentales a participar en un juego de rol en el que interactuaban con personajes de dibujos animados y tomaban decisiones mientras escaneábamos su cerebro.

En el juego, los participantes solo tenían que desplazarse a una nueva ciudad y debían relacionarse con los personajes ficticios para conseguir un trabajo y un lugar en el que estar. Tomaban decisiones acerca de cómo tratar con un personaje dado. Podían pedir que otros hicieran favores para demostrar su poder, o podían someterse a las demandas que les hicieran. En un contacto posterior, podían decidir si mostrar o no un gesto afectuoso: dar un abrazo o guardar la distancia.

Con estas decisiones, marcamos cada personaje en ciertas coordenadas sobre un mapa en el que representamos su movimiento a lo largo de las dimensiones de poder y de filiación. En cada interacción dibujamos una línea o un vector desde el participante hasta el personaje. De esta manera, trazamos las relaciones entabladas como trayectorias a través del espacio social y calculamos la información sobre ángulos y longitudes de los vectores sociales.

Buscamos señales neuronales que trazaran esta información correlacionando la actividad cerebral de cada sujeto experimental con el ángulo y la longitud de los vectores de cada decisión. La actividad en el hipocampo trazaba el ángulo de los personajes al participante. El grado con que la actividad hipocampal recogía estas coordenadas sociales también reflejaba las habilidades sociales referidas por los propios participantes. Estos hallazgos sugieren que el hipocampo supervisa las dinámicas sociales, como lo hace con las ubicaciones físicas, codificando las relaciones entre los puntos en un espacio multidimensional. De hecho, puede ser que a lo largo de cualquier dimensión arbitraria en la que podamos ordenar información, sea física o abstracta, el sistema hipocámpico-entorrinal desempeñe un cometido.

Numerosas preguntas acerca de los mapas sociales del cerebro no tienen respuesta todavía. ¿Cómo interactúa este sistema con otras partes del cerebro? Por ejemplo, en nuestro estudio del juego de rol descubrimos que la corteza cingulada posterior, una región también involucrada en la representación de la información espacial, supervisaba la longitud de los vectores sociales, como una vara de medir de la «distancia social». Además, se halló una señal reticular en otras regiones que están conectadas con el sistema hipocámpico-entorrinal y que tienden a activarse con este, que presumiblemente formarían una red de áreas con funcionalidades comunes.

A medida que se acumulan los datos, surgen también cuestiones trascendentes en el campo de la medicina. ¿Puede un cartografiado deficiente explicar un trastorno psiquiátrico? Otra posibilidad es que los conocimientos obtenidos de esta arquitectura cerebral permitan avanzar en el desarrollo de la inteligencia artificial. Los modelos internos del mundo bien organizados podrían ser la clave para construir máquinas más inteligentes.

Que el mismo sistema de cartografía pueda hallarse detrás de la capacidad de orientación y desplazamiento en el espacio y en el tiempo, del razonamiento, de la memoria y de la imaginación, hasta de las dinámicas sociales, indica que tal vez lo que nos hace ser unos aprendices tan versátiles sea nuestra capacidad para construir modelos del mundo. Este está lleno de relaciones tanto físicas como abstractas. Los callejeros de las ciudades y los mapas mentales de los conceptos interrelacionados nos ayudan a dar sentido al mundo mediante la extracción, la organización y el almacenamiento de la información afín. Una nueva cafetería en una calle familiar se ubica sin dificultad en nuestro mapa espacial. Relacionamos nuevos conceptos con viejas ideas. Y un nuevo conocido puede remodelar nuestro espacio social.

Los mapas nos permiten hacer simulaciones y predicciones, todo desde la seguridad de nuestra mente. Los atajos mentales que podemos evocar de inmediato podrían tener su origen en el mismo sistema con el que elegimos un desvío para evitar un atasco de tráfico. Apenas hemos empezado a descubrir las propiedades y capacidades de este sistema. Los mapas mentales sirven para mucho más que para hallar atajos físicos; nos permiten desenvolvernos por la vida. IyC

PARA SABER MÁS

Social place-cells in the bat hippocampus. David B. Omer et al. en *Science*, vol. 359, págs. 218-224, 12 de enero de 2018.

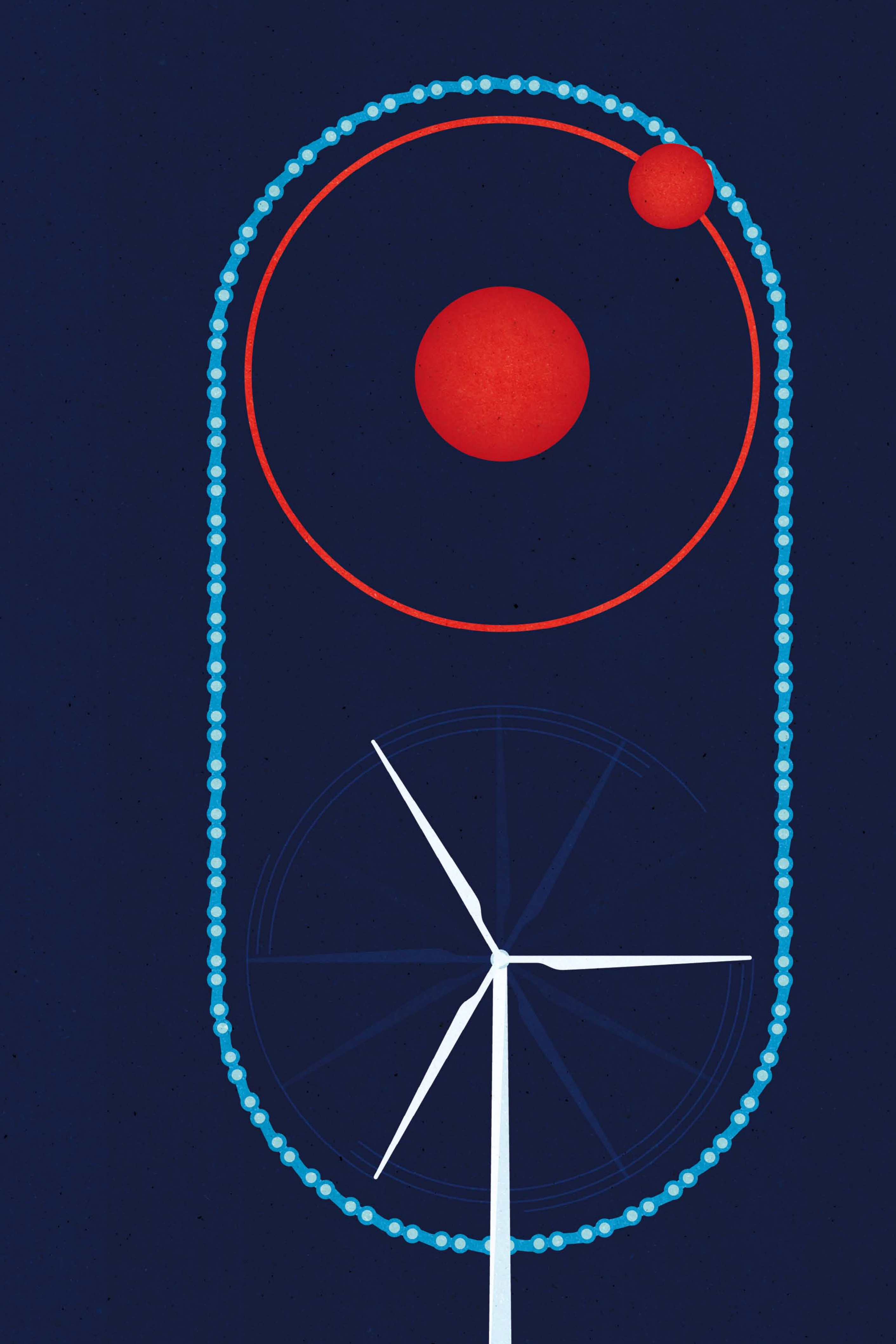
Navigating social space. Matthew Schafer y Daniela Schiller en *Neuron*, vol. 100, n.º 2, págs. 476-489, 24 de octubre de 2018.

What is a cognitive map? Organizing knowledge for flexible behavior. Timothy E. J. Behrens et al. en *Neuron*, vol. 100, n.º 2, págs. 490-509, 24 de octubre de 2018.

Navigating cognition: spatial codes for human thinking. Jacob L. S. Bellmund et al. en *Science*, vol. 362, artículo núm. eaat6766, 9 de noviembre de 2018.

EN NUESTRO ARCHIVO

El GPS del cerebro. May-Britt Moser y Edvard I. Moser en *IyC*, marzo de 2016.



ENERGÍA

LA SOLUCIÓN DEL



El hidrógeno podría reaparecer como una pieza clave del rompecabezas de la energía totalmente renovable

Peter Fairley

Ilustración de Kotryna Zukauskaite

Peter Fairley es escritor científico especializado en energía y medioambiente.



El hidrógeno circula por las tuberías subterráneas de Cappelle-la-Grande y contribuye al suministro energético de un centenar de hogares de esta población del norte de Francia. En una calle próxima al centro, un electrolizador encerrado en un pequeño contenedor metálico emplea la electricidad procedente de parques eólicos y solares para disociar el agua y producir hidrógeno «renovable», que se añade al flujo de gas natural que ya circula por los conductos. Al reemplazar parte de ese combustible fósil, el hidrógeno reduce hasta un 7 por ciento las emisiones de carbono de las calefacciones, los calentadores de agua y las cocinas de la población.

El sistema de Cappelle-la-Grande es un laboratorio viviente creado por la compañía energética francesa Engie. La empresa prevé un gran aumento de la energía basada en hidrógeno a medida que siga disminuyendo el coste de los electrolizadores y de las energías renovables. Si Engie está en lo cierto, introducir hidrógeno en las redes locales de distribución de gas podría acelerar la transición de la energía fósil a la limpia.

Esta compañía no está sola. El hidrógeno renovable es fundamental para las perspectivas de la Comisión Europea de alcanzar cero emisiones netas de carbono en 2050 y también despierta un creciente interés entre los gigantes industriales del continente. A partir del año que viene, las nuevas turbinas para centrales eléctricas fabricadas en la Unión Europea deberían estar preparadas para quemar una mezcla de hidrógeno y gas natural, y los fabricantes de la UE afirman que estarán homologadas para quemar un cien por cien de hidrógeno hacia 2030. Mientras tanto, las siderúrgicas europeas experimentan con el hidrógeno renovable como sustitutivo del carbón en sus hornos.

En realidad, la idea de impulsar la economía con hidrógeno renovable no es nueva. Hace casi un siglo, el famoso genetista y matemático británico J. B. S. Haldane vislumbró una era posterior a los combustibles fósiles caracterizada por «grandes centrales eléctricas» que producirían hidrógeno. Esta visión se tornó fascinación en los albores de nuestro siglo. En su futurista libro de 2002 *The hydrogen economy*, Jeremy Rifkin profetizó que el gas catalizaría una nueva revolución industrial. Las energías solar y eólica disociarían un recurso ilimitado (el agua) para obtener hidrógeno destinado a la electricidad, la calefacción y la energía industrial, e inofensivo oxígeno como subproducto.

En 2003, el presidente George W. Bush presentó un ambicioso programa de investigación de 1200 millones de dólares para generalizar el uso de vehículos de pilas de combustible de hidrógeno en una generación [*véase* «El vehículo del cambio», por Lawrence D. Burns, J. Byron McCormick y Christopher E. Borroni-Bird; Investigación y Ciencia, diciembre de 2002]. Las pilas de combustible de los garajes también servirían como fuentes de electricidad auxiliares para los hogares. Meses después, la revista *Wired* publicó un artículo titulado «El hidrógeno puede salvar Estados Unidos», que defendía que este gas podía acabar con la dependencia del petróleo importado contaminante.

Pero la evolución inmediata no respondió a estas expectativas. Los vehículos eléctricos propulsados por baterías, menos costosos y cada vez más avanzados, acapararon el protagonismo del «coche ecológico». En 2009, la administración de Obama aparcó el tema del hidrógeno. Su primer secretario de energía, el físico y premio Nobel Steven Chu, explicó que la tecnología del hidrógeno aún no estaba lista y que quizás las pilas de combustible y los electrolizadores nunca fuesen rentables.

Pero las investigaciones siguieron, y ahora el propio Chu reconoce que se están superando algunos obstáculos. El ejemplo de Cappelle-la-Grande es solo una pequeña muestra, pero se están empezando a construir decenas de instalaciones cada vez más grandes y ambiciosas, sobre todo en Europa. Como señaló la Agencia Internacional de la Energía en un informe reciente, «actualmente el hidrógeno goza de un impulso político y comercial sin precedentes, con un rápido aumento en el número de políticas y proyectos en todo el mundo».

Esta vez no es el transporte, sino los esfuerzos por descarbonizar la red eléctrica y la industria pesada, lo que ha reavivado el interés por el hidrógeno. «Todos los que nos dedicamos a diseñar modelos energéticos nos tomamos muy en serio la descarbonización profunda», señala Tom Brown, que dirige un equipo de modelización de sistemas energéticos en el Instituto Tecnológico de Karlsruhe. Ciudades, estados y países están ideando vías para aproximarse antes de 2050 a las cero emisiones netas de carbono, basadas sobre todo en la generación eólica y solar.

EN SÍNTESIS

Los planes para conseguir una energía completamente renovable no tendrán éxito a menos que los países reestructuren todos sus sistemas energéticos, incluidos los combustibles.

Los excedentes de energía solar y eólica pueden hacer funcionar electrolizadores que convierten el agua en hidrógeno, el cual se podría almacenar para reconvertirlo en electricidad cuando se necesite.

Para que el creciente interés por el hidrógeno se materialice en infraestructuras, deberían disminuir los costes de producción. También son imprescindibles la aceptación social y las ayudas gubernamentales.



LOS ELECTRODOS DE UN ELECTROLIZADOR disocian las moléculas de agua en oxígeno (*izquierda*) e hidrógeno (*derecha*). Los electrodos miden un centímetro de alto.

DURK GARDENIER, ALAMY

Pero esa estrategia presenta dos problemas de los que no se suele hablar mucho. En primer lugar, las redes eléctricas actuales no tienen capacidad suficiente para manejar las ingentes cantidades de energía renovable que harían falta para cerrar las centrales eléctricas de combustibles fósiles. Y, además, seguiríamos necesitando centrales auxiliares para los períodos prolongados sin sol o viento. Ahora mismo, ese respaldo lo proporcionan las centrales nucleares, de gas natural y de carbón, que los operadores de la red pueden regular fácilmente para compensar los aumentos y disminuciones del suministro renovable.

Según sus partidarios, el hidrógeno puede jugar el mismo papel. Cuando haya mucho viento o sol, los electrolizadores pueden usar parte de la energía renovable para generar hidrógeno, que se almacenaría (literalmente) para cuando lleguen tiempos peores. Entonces se emplearían pilas de combustible o turbinas para reconvertir el hidrógeno en electricidad y reforzar la red.

Reducir de manera drástica las emisiones de carbono también implica encontrar nuevos combustibles para aquellos sectores económicos que no pueden simplemente enchufarse a una gran toma de corriente, como el transporte pesado, así como materias primas alternativas para los productos químicos y materiales actualmente basados en el petróleo, el carbón y el gas natural. «Hay demasiada gente con la idea equivocada de que con la electrificación ya se soluciona todo [el problema del carbono]», afirma Jack Brouwer, experto en energía de la Universidad de California en Irvine, que lleva más de dos decenios diseñando estrategias para limpiar el aire de su región. «Y muchos de nuestros legisladores y agencias estatales han asumido este planteamiento», sin pensar en cómo almacenar la energía o alimentar la industria, añade.

¿Podría el hidrógeno renovable hacer factible una red de energía limpia? ¿Y podría constituir una opción viable para la industria? Se están haciendo algunas apuestas interesantes, aun sin saber si es posible aumentar el uso del hidrógeno de forma rápida y asequible.

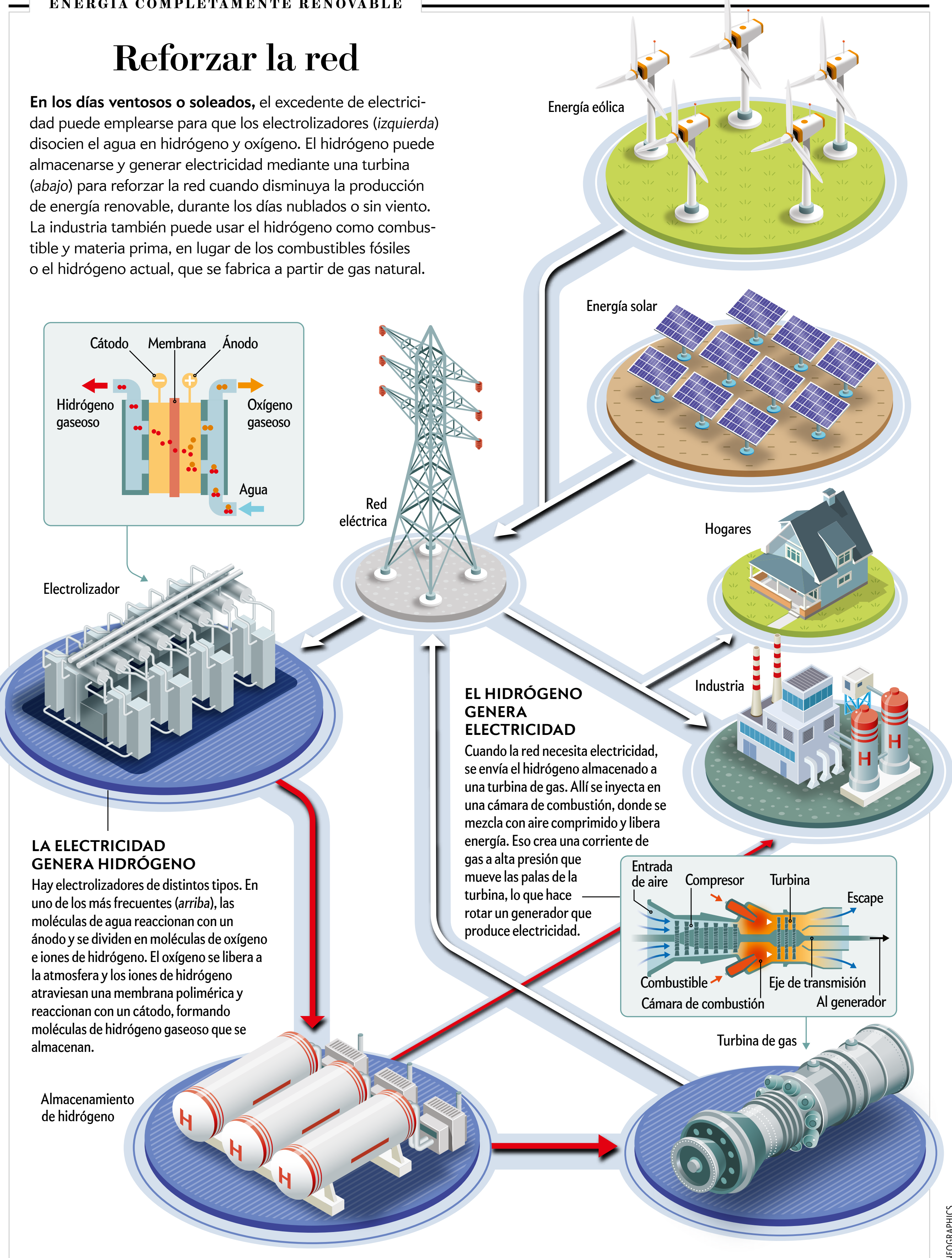
PERÍODOS CALMADOS Y OSCUROS

Los pocos países que han apostado fuerte por reemplazar el carbón y el gas natural con energía solar y eólica comienzan a mostrar signos de tensión. Las energías renovables proporcionaron alrededor del 40 por ciento de la electricidad de Alemania en 2018, aunque con grandes fluctuaciones: algunos días, las instalaciones solares y eólicas generaron más del 75 por ciento de la energía del país, mientras que otros su contribución se redujo al 15 por ciento. Los operadores de la red gestionan tales picos y valles ajustando la salida de las centrales nucleares y de combustibles fósiles, los almacenes de energía hidroeléctrica y las grandes baterías. Las energías eólica y solar también superan cada vez más a menudo el límite que puede soportar el saturado tendido eléctrico alemán, obligando a los operadores de la red a desconectar algunos generadores renovables, lo que supuso la pérdida de 1400 millones de euros tan solo en 2017.

El principal problema es cómo se adaptarán los países al cierre progresivo de las centrales eléctricas de combustibles fósiles (y de las centrales nucleares, en el caso de Alemania). ¿Cómo mantendrán el suministro de electricidad durante los períodos oscuros y sin viento? Los expertos en modelos energéticos ale-

Reforzar la red

En los días ventosos o soleados, el excedente de electricidad puede emplearse para que los electrolizadores (*izquierda*) disocien el agua en hidrógeno y oxígeno. El hidrógeno puede almacenarse y generar electricidad mediante una turbina (*abajo*) para reforzar la red cuando disminuya la producción de energía renovable, durante los días nublados o sin viento. La industria también puede usar el hidrógeno como combustible y materia prima, en lugar de los combustibles fósiles o el hidrógeno actual, que se fabrica a partir de gas natural.



LA ELECTRICIDAD GENERA HIDRÓGENO

Hay electrolizadores de distintos tipos. En uno de los más frecuentes (*arriba*), las moléculas de agua reaccionan con un ánodo y se dividen en moléculas de oxígeno e iones de hidrógeno. El oxígeno se libera a la atmosfera y los iones de hidrógeno atraviesan una membrana polimérica y reaccionan con un cátodo, formando moléculas de hidrógeno gaseoso que se almacenan.

EL HIDRÓGENO GENERA ELECTRICIDAD

Cuando la red necesita electricidad, se envía el hidrógeno almacenado a una turbina de gas. Allí se inyecta en una cámara de combustión, donde se mezcla con aire comprimido y libera energía. Eso crea una corriente de gas a alta presión que mueve las palas de la turbina, lo que hace rotar un generador que produce electricidad.

manes acuñaron un término para referirse a tales sequías de las energías renovables: *Dunkelflauten*, o «períodos calmados y oscuros». Los estudios meteorológicos indican que las redes eléctricas de Estados Unidos y Alemania deberán hacer frente a *Dunkelflauten* de hasta dos semanas de duración.

Unas redes de transmisión más robustas podrían ayudar a combatir estos períodos distribuyendo la electricidad a través de extensas regiones, o incluso continentes. Así, podrían enviar grandes cantidades de energía desde áreas que en un momento dado presentan fuertes vientos o un sol radiante hasta lugares distantes que están en calma o nublados. Pero expandir la red entraña grandes dificultades. En Alemania, la ampliación del tendido eléctrico lleva años de retraso como consecuencia de las protestas. En Estados Unidos, una oposición similar impide la aprobación de nuevas líneas eléctricas.

Así las cosas, algunos expertos opinan que los períodos calmados y oscuros hacen de la energía eólica y solar una opción arriesgada. Las simulaciones de redes eléctricas que realizó en 2018 un grupo de expertos del Instituto de Tecnología de Massachusetts (MIT) predicen un aumento exponencial de los costes a medida que se avance hacia el cien por cien de energía renovable. Ello se debe a que asumieron que haría falta instalar grandes (y costosas) baterías y mantenerlas cargadas en todo momento, pese a que quizá no se usarían más que unos pocos días, o incluso horas, al año.

En California, otro equipo de científicos llegó a una conclusión similar en 2018: hallaron que, incluso con grandes baterías y líneas de transmisión, las energías solar y eólica solo podrían satisfacer el 80 por ciento de la demanda eléctrica estadounidense. Según Ken Caldeira, miembro del equipo y climatólogo del Instituto Carnegie para la Ciencia, no hay duda de que se necesitarán otras fuentes de energía.

Algunos expertos europeos sostienen que los estudios del MIT y del equipo californiano son demasiado cortos de miras. Durante decenios, los investigadores europeos han adoptado una visión más general, considerando no solo la red eléctrica, sino el espectro completo de recursos energéticos empleados en la sociedad moderna. Iniciados por Bent Sørensen, físico de la Universidad de Roskilde (Dinamarca), y varios de sus discípulos, tales estudios de «sistemas energéticos integrados» combinan simulaciones de redes eléctricas, redes de distribución de gas natural e hidrógeno, sistemas de transporte, industrias pesadas y sistemas de calefacción central.

Los modelos muestran que acoplar esos sectores aporta flexibilidad operativa, y el hidrógeno constituye una potente herramienta para conseguirlo. Desde ese punto de vista, una red eléctrica cien por cien renovable que emplease hidrógeno para almacenar energía de cara a los períodos calmados y oscuros podría ser viable, y no presentaría la escalada de precios pronosticada por el grupo del MIT.

Ciertos estudios sobre la red eléctrica estadounidense descartaron el almacenamiento de energía mediante hidrógeno debido a los elevados costes actuales. Sin embargo, otros expertos no creen que sea un argumento válido. Por ejemplo, muchos estudios publicados hace un decenio menospreciaban la energía solar porque en ese momento era cara; el drástico abaratamiento ocurrido desde entonces demuestra lo errado de ese análisis. Algunas simulaciones europeas, como las de Brown, tienen en cuenta las previsibles reducciones de costes al calcular las formas más baratas de eliminar las emisiones de carbono. El resultado es un despliegue de electrolizadores que aminora los costes del hidrógeno renovable.

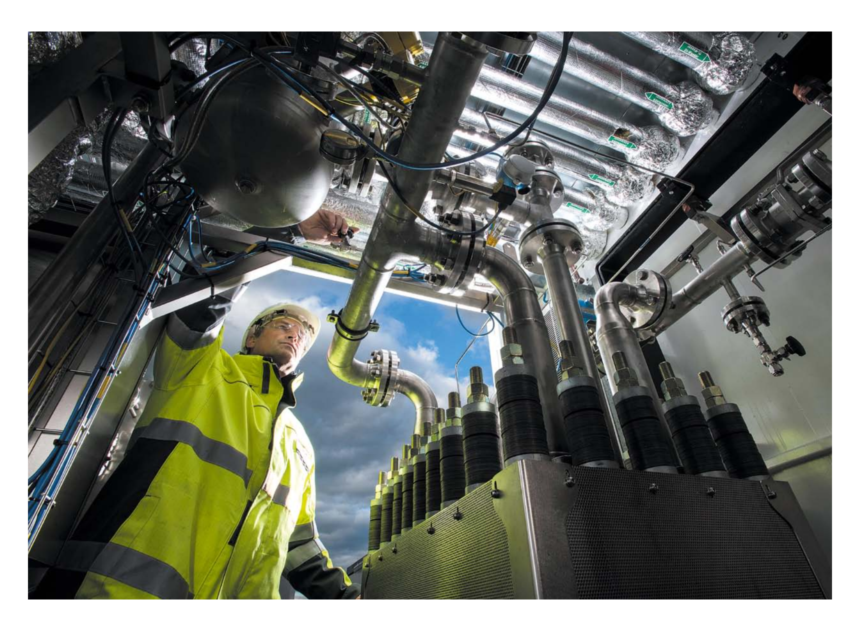
En los modelos, los electrolizadores comienzan por reemplazar el hidrógeno generado a partir de gas natural, que se emplea en distintas etapas del procesamiento realizado en plantas químicas y refinerías de petróleo. La producción de este hidrógeno «gris» (como lo llaman los expertos en energía) libera cada año más de 800 millones de toneladas de dióxido de carbono en todo el mundo, lo que equivale a las emisiones totales conjuntas del Reino Unido e Indonesia, según la Agencia Internacional de la Energía. Sustituir el hidrógeno gris por el renovable reduciría la huella de carbono del hidrógeno empleado en la industria. Parte del hidrógeno también podría suplir el gas natural y el combustible diésel que usan los camiones pesados, autobuses y trenes. Aunque las pilas de combustible lo tienen difícil para competir con las baterías de los automóviles, en los vehículos más pesados podrían resultar más prácticas. Los camiones articulados que fabrica y comercializa la compañía Nikola Motor serán capaces de recorrer entre 800 y 1200 kilómetros con una pila de combustible llena, en función de distintos factores relacionados con el equipamiento y la carga.

Quizás el mayor reto al que se enfrente el hidrógeno renovable sea el coste de los electrolizadores. La producción del gas debería abaratarse desde los 4 dólares (o más) por kilogramo actuales hasta 2 dólares o menos

Si la industria y el transporte pesado apostaran por el hidrógeno renovable, podrían surgir redes de distribución regionales que también podrían suministrar este gas libre de carbono a las centrales de respaldo que refuerzan las redes eléctricas. Eso es lo que ocurre en las simulaciones de sistemas integrados: a medida que se produce y consume más hidrógeno renovable, se desarrollan redes de distribución a gran escala que almacenan gas como para varios meses en grandes tanques o cavernas subterráneas (como se guarda hoy en día el gas natural), con un coste menor que el de almacenar electricidad en baterías. «En cuanto uno admite que el hidrógeno es importante para el resto de sectores, el almacenamiento a largo plazo para el sector eléctrico aparece como una especie de subproducto», señala Brown.

Esa perspectiva cobra vida en las simulaciones de Christian Breyer, de la Universidad LUT, en Finlandia. Los últimos escenarios de energía cien por cien renovable considerados por su equipo, publicados en 2019 junto al Energy Watch Group (un grupo internacional de científicos y parlamentarios), incluyen centrales que producen electricidad a partir del hidrógeno almacenado y que se activan durante los períodos calmados y oscuros más acusados para llenar el vacío de la red. «Se emplean como último recurso», afirma Breyer. «Sin esas grandes turbinas, el sistema energético sería inestable en ciertos momentos del año.»

En el modelo de Breyer, se reconvierte en electricidad menos de la mitad de la energía eólica y solar requerida para producir



UN INGENIERO revisa las tuberías que distribuyen el hidrógeno producido con energías renovables en Hamburgo.

JOERG BOETHLING, ALAMY

y almacenar el hidrógeno, lo que supone una gran pérdida, y los turbogeneradores que generan electricidad a partir del hidrógeno solo funcionan unas pocas semanas al año. Pero la baja eficiencia de la conversión del hidrógeno en electricidad es asumible, dado que se recurre a ella muy de tarde en tarde. Breyer afirma que este esquema constituye la solución más económica y no difiere tanto del modo en que muchas redes usan las centrales de gas natural. «Desde hace decenios hay centrales eléctricas que solo se encienden una vez cada pocos años», señala.

GASODUCTOS RECONVERTIDOS

Europa confía en el hidrógeno renovable para descarbonizar sus sistemas energéticos, a pesar de que actualmente se produzca muy poco. Según las previsiones de la Comisión Europea, las energías renovables supondrán más del 80 por ciento del suministro energético europeo en 2050, respaldadas por más de 50 gigavatios de electrolizadores (la capacidad de unas 50 centrales nucleares). Los Estados miembros también definen sus propios objetivos. Por ejemplo, Francia quiere que las industrias que consumen hidrógeno empleen un 10 por ciento de hidrógeno renovable en 2022, y entre un 20 y un 40 por ciento en 2027.

Será difícil alcanzar esas metas sin políticas que animen a las empresas innovadoras a fabricar electrolizadores en serie. Un buen punto de partida es introducir hidrógeno en los conductos de gas natural, porque supone usar infraestructuras que ya existen. Durante mucho tiempo, los ingenieros asumieron que el hidrógeno molecular (que es muy reactivo y la molécula más pequeña que existe) se degradaría o escaparía de las tuberías de gas natural. Pero los últimos estudios demuestran que puede usarse una mezcla con entre un 20 y un 25 por ciento de hidrógeno sin que este se filtre o dañe los conductos. En Europa se permite la mezcla, y ya hay empresas en Italia, Alemania o Reino Unido que inyectan hidrógeno en decenas de lugares para alimentar calentadores, cocinas y otros electrodomésticos, los cuales no precisan modificaciones siempre que el contenido de hidrógeno se mantenga por debajo del 25 por ciento, aproximadamente.

Engie lleva más de un año mezclando hidrógeno en Cappelle-la-Grande sin que se hayan producido incidentes ni protestas, asegura Hélène Pierre, directora del proyecto. Un aspecto que favorece la aceptación es que se realiza un seguimiento exhaustivo para demostrar que el aire de los hogares que usan la mezcla es más limpio. Pierre indica que añadir hidrógeno mejora la combustión del gas en los electrodomésticos y eso reduce la concentración de agentes contaminantes como el monóxido de carbono.

La próxima tanda de proyectos europeos en torno al hidrógeno renovable podría aumentar la escala de producción. Algunos consorcios industriales en Francia y Alemania buscan financiación y permisos para fabricar electrolizadores de 100 megavatios, 10 veces más potentes que los de hoy en día. Dos ambiciosos proyectos de electrolizadores compiten por las ayudas gubernamentales para impulsar la economía del hidrógeno a nivel regional en los alrededores de Lingen, una ciudad del noroeste de Alemania con un par de refinerías de petróleo. Uno de ellos, en el que participan la compañía energética Enertrag y algunas de las mayores empresas de energía e ingeniería de Alemania, podría servir de prototipo para una red de hidrógeno a nivel nacional. El proyecto aprovecha las infraestructuras de gas existentes, pero no para realizar una mezcla. El plan es reutilizar conductos de gas en desuso para suministrar hidrógeno renovable a las refinerías locales, a una central eléctrica e incluso a una futura estación de servicio para vehículos de pilas de combustible. «Nuestra idea es desarrollar una red de gas que distribuya solo hidrógeno», confirma Frank Heunemann, director general de Nowega, una de las empresas asociadas al proyecto y operadora de la red regional de gas.

Nowega puede reutilizar algunas tuberías vacías porque la región dispone de dos redes de distribución de gas natural. Una transporta gas natural estándar, compuesto principalmente por metano. La otra se construyó para distribuir un gas natural local rico en sulfuro de hidrógeno (y el hidrógeno puede hacer que las tuberías de acero sean más propensas a romperse). Nowega está eliminando poco a poco la distribución del gas local, y eso deja unos conductos de acero vacíos que, según Heunemann, deberían resistir cualquier reacción con el hidrógeno puro. La compañía RWE, proveedora de energía en Europa, construirá el principal electrolizador del consorcio y piensa usar parte del hidrógeno en su central eléctrica de Lingen. El gigante tecnológico Siemens optimizará una de las cuatro turbinas de gas de la planta para trabajar con hidrógeno puro.

El consorcio también tiene planes de expansión. Lingen se encuentra a unos 48 kilómetros de unas cuevas salinas subterráneas creadas para almacenar gas natural. Heunemann apunta que el siguiente paso lógico podría ser guardar parte del hidrógeno de Lingen en una de esas cavernas, a más de 1000 metros de profundidad. (El hidrógeno ya se almacena de forma masiva en cuevas de Texas y Reino Unido.)

Nowega también prevé la construcción de una red de conductos de 3200 kilómetros que llegaría a la mayoría de plantas siderúrgicas, refinerías y fábricas de productos químicos de Alemania. La idea es reutilizar los conductos de gas natural que se construyeron originalmente para transportar gas ciudad, un combustible producido a partir del carbón y rico en hidrógeno que era muy común en Europa hasta la década de los sesenta.

Las tuberías que en el pasado soportaron gas con un 50 por ciento de hidrógeno también deberían ser aptas «para el uso con hidrógeno puro», afirma Heunemann.

UN FUTURO INCIERTO

El creciente interés por el hidrógeno renovable no es exclusivo de Europa. Japón planea una transición de varias décadas hacia una «sociedad del hidrógeno», la cual forma parte de su política energética oficial desde 2014. Uno de los primeros objetivos de Japón —probar que disponen de los medios tecnológicos para importar hidrógeno de forma eficiente— debería comenzar a cumplirse en 2020 con el transporte de hidrógeno gris en buques cisterna desde Brunéi, país que dispone de abundantes reservas de gas. En Australia, los partidos políticos rivales están elaborando planes separados para exportar hidrógeno a Japón. En diciembre de 2019, los ministros de energía de los estados y territorios australianos adoptaron un plan nacional del hidrógeno y el Gobierno del país anunció que destinará 370 millones de dólares australianos (unos 210 millones de euros) a incentivar proyectos relacionados con el hidrógeno.

Estados Unidos también ha mostrado signos de estar recuperando el interés. El Gobierno federal está volviendo a fijar objetivos respecto a las tecnologías del hidrógeno, algunas compañías energéticas están invirtiendo en ellas y unos pocos estados están ofreciendo ayudas. La ciudad de Los Ángeles puede marcar el camino. Con el *Nuevo acuerdo ecológico de Los Ángeles*, presentado por el alcalde Eric Garcetti en abril de 2019, la urbe se comprometió a suministrar un 80 por ciento de electricidad renovable en 2036 y el cien por cien en 2045. El alcalde también ha avanzado que planea construir parques solares y está levantando una nueva central eléctrica de gas natural para garantizar una fuente de electricidad de respaldo, la cual podría reconvertirse para quemar hidrógeno renovable; cerca de 125 kilómetros de tuberías ya suministran hidrógeno gris a las refinerías de la zona. Y las pilas de combustible compiten con las baterías de cara a la readaptación energética de los 16.000 camiones que transportan mercancías en los puertos de la región. Alimentar esos camiones con hidrógeno en lugar de diésel podría mejorar notablemente la situación de los brumosos cielos de Los Ángeles.

Brouwer defiende que todo el estado debería hacer una reflexión más profunda sobre la energía en su empeño por eliminar las emisiones de carbono. De acuerdo con las previsiones del Laboratorio Nacional Lawrence en Berkeley, hacia 2025 California podría llegar a desaprovechar más de ocho teravatios hora de potencial energético renovable al año. Una energía que, en opinión de Brouwer, el estado debería reservar en forma de hidrógeno para limpiar sus refinerías y satisfacer la ingente demanda eléctrica durante las olas de calor estivales.

Otros expertos coinciden en que el hidrógeno puede servir para conectar esas ideas. Un estudio reciente a cargo de la Iniciativa de Futuros Energéticos (Energy Futures Initiative), un grupo de reflexión liderado por Ernest Moniz, exfísico nuclear del MIT y segundo secretario de energía de EE.UU. durante el mandato de Obama, hace un llamamiento a California para que aproveche el «enorme valor» del hidrógeno renovable y de otros combustibles con bajas emisiones de carbono. El estudio concluye que sin ellos podría ser imposible cumplir las metas estatales respecto a la reducción de emisiones.

Con todo, hay muchos posibles problemas que podrían paralizar o evitar la ampliación de las infraestructuras del hidrógeno en California, Europa y otros lugares. Una cuestión persistente es la inquietud social. El hidrógeno es muy inflamable y ocurren accidentes. El verano pasado, en Noruega, una válvula defectuosa causó una explosión de hidrógeno en una estación de servicio para coches de pilas de combustible. Los muros antiexplosiones de hormigón minimizaron los daños personales, pero los medios de comunicación enseguida pusieron en tela de juicio que la energía basada en el hidrógeno pudiera sobrevivir al incidente. En noviembre de 2019, el gobernador de California, Gavin Newsom, solicitó a la comisión estatal de servicios públicos que agilizara el cierre de un almacén subterráneo de gas donde, cuatro años atrás, se había producido una fuga de gas natural que duró cuatro meses y obligó a evacuar a miles de familias.

Todas las opciones energéticas presentan riesgos y la oposición de la sociedad complica muchas de las vías hacia una energía sin emisiones de carbono. A los habitantes de muchos lugares no les entusiasman la energía nuclear, las líneas de alta tensión ni las turbinas eólicas. Sin embargo, puede que el mayor reto al que se enfrente el hidrógeno renovable sea el coste de los electrolizadores. Para comenzar a reemplazar el hidrógeno gris en la industria, la producción del hidrógeno renovable debería abaratarse desde los 4 dólares (o más) por kilogramo actuales hasta 2 dólares o menos. Diversos estudios indican que eso podría ocurrir hacia 2030 si el coste de los electrolizadores continúa bajando al ritmo de los últimos años.

Los estudios también indican que el futuro del hidrógeno peligra en ausencia de incentivos gubernamentales. En un informe reciente, la Agencia Internacional de la Energía subraya que el hidrógeno precisa el mismo tipo de ayudas gubernamentales que promovieron la implantación inicial de las energías solar y eólica, dos industrias que hoy atraen inversiones de más de 100.000 millones de dólares al año en todo el mundo. Según la agencia, estos ejemplos demuestran que «las políticas y la innovación tecnológica tienen la capacidad de crear industrias globales de energía limpia».

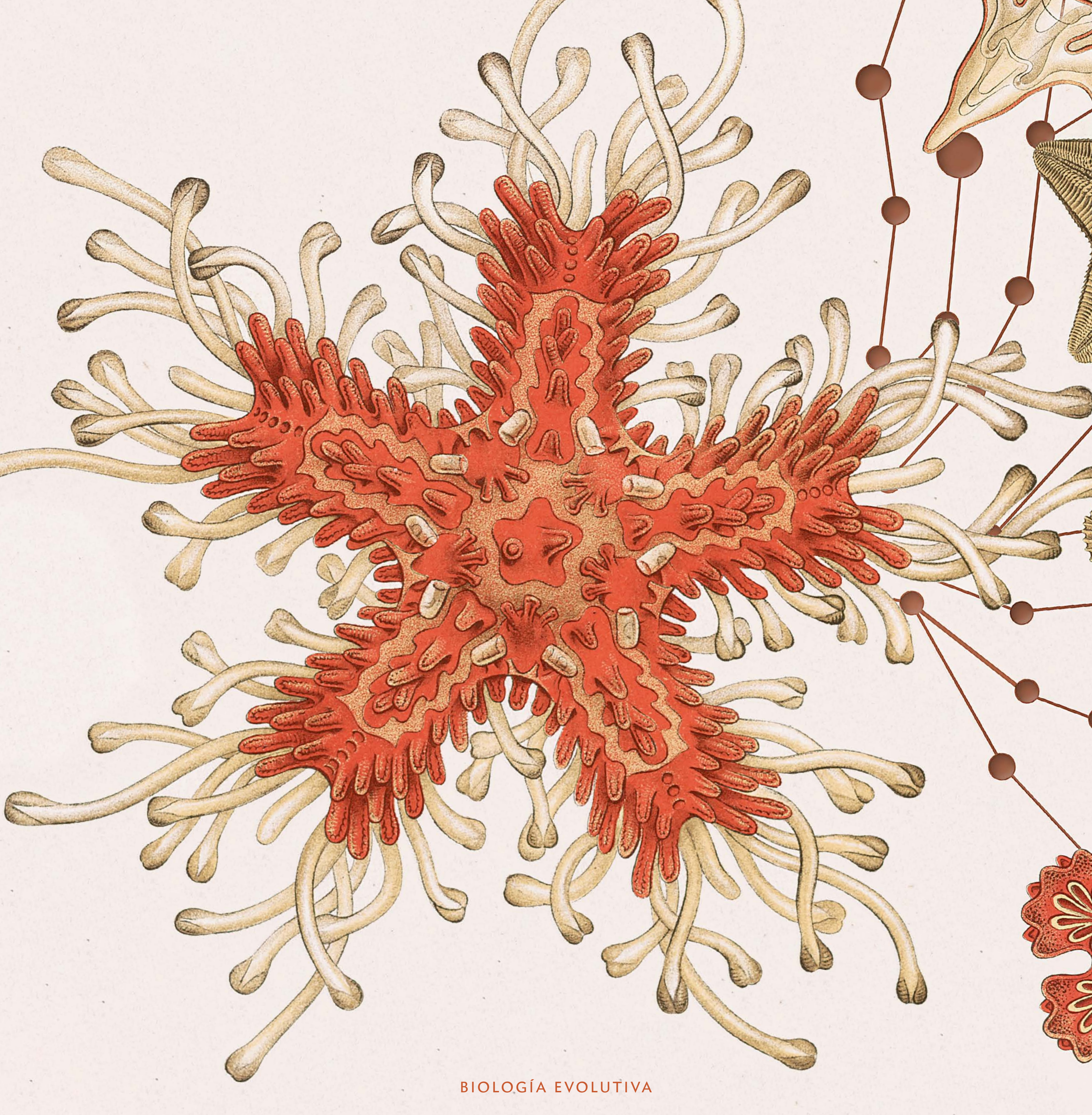
Las mejoras tecnológicas podrían estar al caer. Se están empezando a comercializar los electrolizadores de óxido sólido, que producen casi un 30 por ciento más de hidrógeno que los basados en una membrana de intercambio de protones, que son los que usa Engie y la mayor parte de la industria. Chu, el escéptico exsecretario de energía de EE.UU. (que ahora es profesor en la Universidad Stanford), está trabajando en un novedoso electrolizador que produciría hidrógeno más rápido y con menor consumo de energía gracias a un diseño más compacto y otras adaptaciones. Según Chu, estos cambios podrían suponer «una gran diferencia en los costes de explotación». Es una más de las razones que le han llevado a interesarse por el hidrógeno. IyC

PARA SABER MÁS

Hydrogen roadmap Europe. Informe de la Empresa Común de Pilas de Combustible e Hidrógeno, febrero de 2019.
The future of hydrogen: Seizing today's opportunities. Informe de la Agencia Internacional de la Energía, junio de 2019.

EN NUESTRO ARCHIVO

En torno a una economía del hidrógeno. Matthew L. Wald en *IyC*, julio de 2004.
Una red de energía para la economía del hidrógeno. Paul M. Grant, Chautcey Starr y Thomas J. Overbye en *IyC*, septiembre de 2006.
Hidrógeno: ¿una energía limpia para el futuro? Vincent Artero, Nicolas Guillet, Daniel Fruchart y Marc Fontecave en *IyC*, octubre de 2012.
Fuentes naturales de hidrógeno. Alain Prinzhofer y Éric Deville en *IyC*, abril de 2016.



BIOLOGÍA EVOLUTIVA

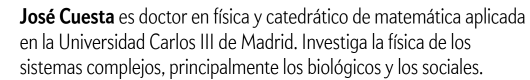
REDES DE GENOTIPOS: LOS SENDEROS DE LA EVOLUCIÓN



¿Cómo navega la vida a través del océano casi infinito de posibilidades biológicas? La teoría de redes recrea escenarios que Darwin no pudo imaginar

Susanna Manrubia y José A. Cuesta

Susanna Manrubia es doctora en física e investigadora en el Centro Nacional de Biotecnología del CSIC, en Madrid. Su labor se centra en el estudio de los mecanismos evolutivos a diferentes escalas.


José Cuesta es doctor en física y catedrático de matemática aplicada en la Universidad Carlos III de Madrid. Investiga la física de los sistemas complejos, principalmente los biológicos y los sociales.



TODO EL MUNDO CONOCE A LEWIS CARROLL POR SUS RELATOS *ALICIA EN EL País de las Maravillas* y *Alicia a través del espejo*. Pero, además de una leyenda de la literatura inglesa, el reverendo Charles Lutwidge Dodgson fue también un matemático de cierta relevancia que escribió sobre lógica, geometría, álgebra, criptografía, aritmética electoral y, muy especialmente, sobre matemática recreativa. Era un hombre de gran ingenio, aficionado a las paradojas, los acertijos y los juegos, de los que inventó unos cuantos.

Uno de ellos, que publicó con el nombre de «doblete» y que aún aparece en periódicos y revistas bajo el título «escalera de palabras», consiste en unir dos palabras cortas, como AMOR y ODIO, mediante una cadena de términos intermedios. Cada uno de ellos ha de ser una palabra válida del idioma y ha de diferenciarse del anterior en tan solo una letra. Por ejemplo:

AMOR – AMAR – ASAR – ASIR – ASIÓ – ALIÓ – OLIÓ – ODIO

En un artículo publicado el 7 de febrero de 1970 en la revista *Nature*, John Maynard Smith, a la sazón profesor de la Universidad de Sussex y uno de los biólogos teóricos más brillantes del pasado siglo, se apoyó en este pasatiempo para esbozar la solución a un problema planteado por Frank B. Salisbury, de la Universidad Estatal de Utah, en un artículo publicado el año anterior en la misma revista.

Las proteínas, los ladrillos fundamentales de la materia viva, son cadenas formadas por una sucesión de aminoácidos, cada uno de los cuales puede escogerse de un conjunto de veinte distintos. Salisbury calculó que el número de secuencias posibles de aminoácidos para una proteína de longitud típica ascendía a la fabulosa cifra de 10^{540}. Sin embargo, el número de proteínas que habrían podido generarse por mutaciones en la Tierra desde que esta se formó (suponiendo un océano primigenio que cubriese todo el planeta, con una densidad de trillones de proteínas por centímetro cúbico, cada una de las cuales mutase a un ritmo de millones de veces por segundo durante 4000 millones de años) no podía ser mucho mayor de 10^{65}. Por tanto, asumiendo —como entonces se creía— que cada proteína está codificada por una secuencia de ADN única, la probabilidad de que una proteína capaz de realizar una función dada aparezca por una mutación al azar es esencialmente nula. Así pues, la selección natural resultaría ineficaz, puesto que no tendría material (es decir, secuencias funcionales) sobre el que trabajar. De esta manera Salisbury ponía de relieve uno de los grandes problemas no resueltos de la teoría evolutiva: ¿cómo genera variedad la naturaleza sin perder la función biológica por el camino?

Cuando concibió su teoría evolutiva, Charles Darwin se percató de algo más fundamental que el mecanismo de selección natural con el que esta siempre se asocia. Comprendió que un proceso evolutivo consiste en el cambio en la composición de una población, y que para que ese cambio se produzca de forma adaptativa se requieren tres condiciones básicas. En primer lugar, ha de existir un mecanismo de reproducción con herencia: las poblaciones deben renovarse (porque los individuos no evolucionan) y los hijos deben parecerse a los padres (porque de lo contrario no perdurarían los caracteres). En segundo lugar se necesita variación: la reproducción no debe ser fiel al cien por cien, sino que ha de haber pequeñas variaciones que «exploren» otras posibilidades. Por último, la selección natural se encarga de que las variaciones más eficaces (las que aumentan la capacidad reproductiva) acaben dominando la población.

En *El origen de las especies*, publicado en 1859, Darwin habla sobre todo de este último mecanismo, por la sencilla razón de que ignoraba la naturaleza del proceso de herencia y el origen de las variaciones. El problema de la herencia lo había resuelto Gregor Mendel con su descubrimiento de la genética, pero el mundo no lo supo hasta que no empezó el nuevo siglo. Desde ese momento, todos los hallazgos en esa nueva disciplina acabarían incorporados a la teoría evolutiva, dando lugar a mediados del

EN SÍNTESIS

Para cualquier organismo o incluso para las proteínas más simples, el espacio de genomas posibles es muchísimo mayor que todo lo que haya podido explorar la evolución desde el origen de la vida en la Tierra.

Si las mutaciones aleatorias solo pueden recorrer una parte mínima de las posibilidades biológicas, ¿cómo halla la naturaleza soluciones a problemas adaptativos? ¿Cómo surge la diversidad necesaria para que la selección natural pueda actuar?

La respuesta se encuentra en la compleja relación entre secuencias genéticas y fenotipos. Un nuevo marco teórico basado en la teoría de redes está comenzando a revelar la estructura subyacente que permite que la evolución darwinista tenga lugar.

PÁGINAS ANTERIORES: ERNST HAECKEL, KUNSTFORMEN DER NATUR, LÁMINA 40/DOMINIO PÚBLICO (*organismos*); *INVESTIGACIÓN Y CIENCIA* (*adaptación*)

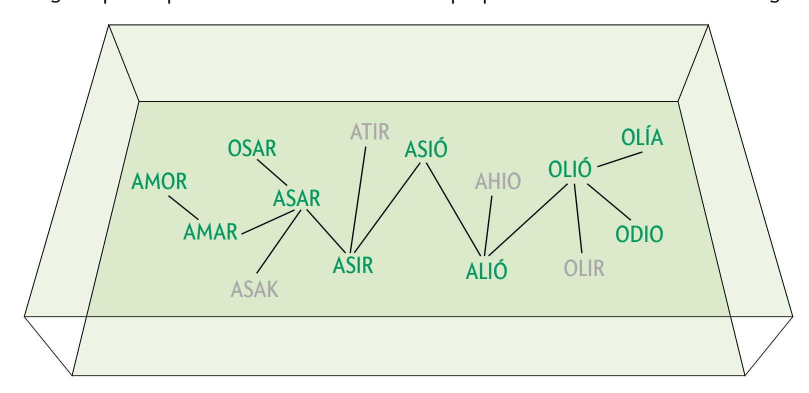
¿Por qué no se extravía la evolución?

Charles Darwin explicó la evolución biológica por medio de la selección natural: las poblaciones cambian gradualmente con el tiempo, y en cada momento los organismos mejor adaptados al medio (es decir, con mayor capacidad reproductiva) acaban dominando sobre los demás. No obstante, su teoría dejó en el aire un aspecto clave: ¿cómo surgen esos organismos mejor adaptados? ¿Cómo se origina la diversidad necesaria para que la selección natural pueda actuar?

Durante largo tiempo se pensó que cada secuencia genética estaba asociada a un fenotipo (o función biológica) y que las mutaciones aleatorias del genoma bastaban para explorar las distintas posibilidades. En 1969, sin embargo, el biólogo Frank B. Salisbury argumentó con un cálculo sencillo que dicha hipótesis se enfrentaba a un serio problema.

Para proteínas simples, Salisbury estimó que el número de secuencias posibles era unas 10^{500} veces mayor que la cantidad de proteínas distintas que habían podido existir en la Tierra desde su formación. Por tanto, la probabilidad de que la naturaleza encontrase la solución a un problema adaptativo dado sería tan minúscula que ni siquiera el tiempo de vida del universo bastaría para dar con ella. En otras palabras: el océano de posibilidades genéticas es tan inconcebiblemente vasto que no queda claro cómo la evolución puede explorarlo sin perderse por el camino en un sinfín de posibilidades sin sentido.

Un año después, el biólogo teórico John Maynard Smith conjeturó que, al igual que las palabras cortas de un idioma están conectadas mediante cambios simples (*ilustración*), también las proteínas funcionales debían formar redes conexas en cierto «espacio de proteínas». Y, del mismo modo que es posible modificar las letras de una palabra sin abandonar el idioma, esa estructura subyacente posibilitaría que las proteínas mutasen sin perder por ello su funcionalidad. En los últimos años, distintos trabajos han comenzado a revelar la naturaleza y las propiedades de dichas redes biológicas.



CAMBIAR SIN PERDER EL SIGNIFICADO: Las palabras válidas de un idioma (*verde*) no son secuencias aleatorias de caracteres, sino que están fuertemente correlacionadas. Ello permite conectarlas por medio de «mutaciones» simples como el cambio de una letra.

siglo xx a lo que dio en llamarse «síntesis moderna». Pero sobre la variación, la única hipótesis que se manejaba era que esta se producía por azar. De este modo, la genética de poblaciones (que es como se denomina la formulación matemática de la síntesis moderna) acabó construyéndose sobre un compendio de modelos estocásticos.

Así estaban las cosas cuando el mundo descubrió las proteínas, el ADN y los mecanismos moleculares tras la variación; un conocimiento que ha experimentado su auge en la era de la genómica y que aún continúa en la actualidad. Esto nos lleva de vuelta al artículo de Maynard Smith y al juego de la escalera de palabras. Si uno entiende las letras como aminoácidos y las palabras como proteínas, el juego proporciona una metáfora de cómo la evolución puede explorar el espacio de proteínas funcionales. Dada una palabra, consideremos todas aquellas que podemos formar al ir cambiando cada una de sus letras. La gran mayoría de esos nuevos términos serán palabras sin sentido, inexistentes en el idioma. Sin embargo, también habrá algunas con significado. Y de igual modo, cerca de una proteína habrá un gran número de mutantes ineficientes, pero también algunas que serán funcionales. Así pues, las proteínas, como las palabras de un idioma, formarían una red que, aunque ocupa un espacio diminuto en el conjunto de secuencias posibles, les permite variar hasta transformarse por completo sin perder por ello la funcionalidad, su «pertenencia al idioma».

Para llegar a esta hipótesis, Maynard Smith se estaba apoyando en la teoría neutralista de la evolución molecular que poco antes había propuesto el biólogo de la Universidad de Kioto Motoo Kimura. Este se percató de que la variabilidad observada en las proteínas de distintas especies de mamíferos solo podía justificarse si la tasa de mutación era desproporcionadamente alta (¡una mutación en el genoma cada dos años!), por lo que llegó a la conclusión de que la inmensa mayoría de las mutaciones producidas a lo largo de la evolución tienen que ser «neutras»; es decir, no deben provocar cambios en la función de las proteínas. Esta idea se suavizó más tarde cuando Tomoko Ohta, colaboradora de Kimura, desarrolló su teoría cuasineutralista, según la cual el tamaño de una población es inversamente proporcional a su «ceguera» a cambios funcionales. Con todo, las consecuencias de la neutralidad tienen un alcance inesperado. Una de las más importantes es precisamente la de permitir la existencia de redes de proteínas funcionales, como las que proponía Maynard Smith con la metáfora de la escalera de palabras.

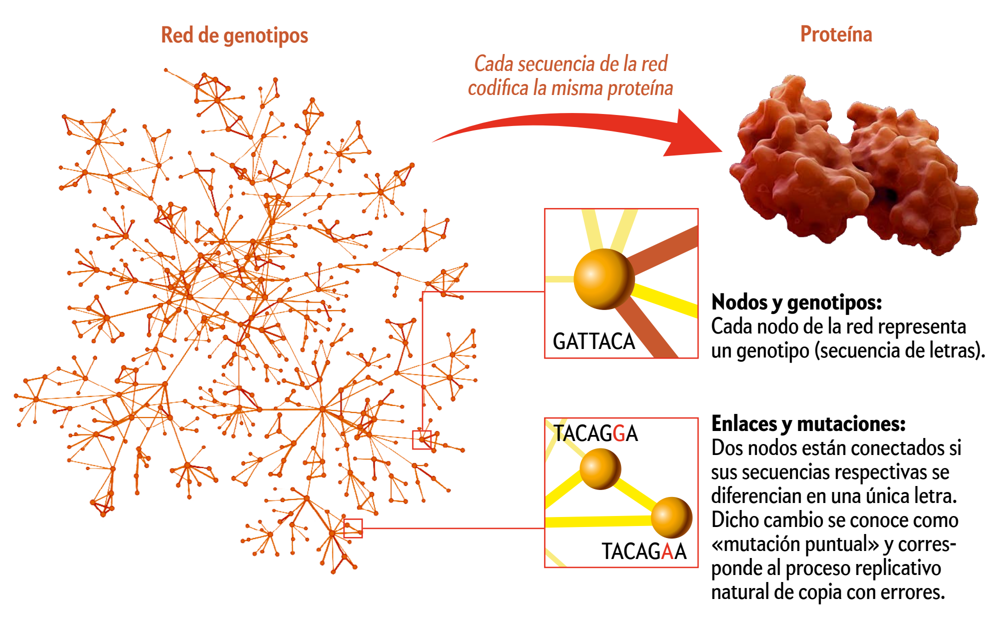
Sin embargo, a pesar de que dichas redes de proteínas parecen ser la única forma de reconciliar la observación de Salisbury con la teoría de la evolución, la biología no es como la matemática, donde la necesidad obliga a la existencia. Así que, hasta hace poco, la cuestión seguía abierta: ¿son reales esas redes de proteínas? Y de ser así, ¿qué estructura tienen? ¿Cómo «navega» la evolución a través de ellas?

En los últimos años, estas preguntas han comenzado a ser respondidas gracias a la cantidad de datos que han proporcionado los trabajos en genómica y a las herramientas matemáticas de la teoría de redes. Al contrario de lo que se había pensado durante largo tiempo, hoy sabemos que ni las secuencias genéticas se distribuyen al azar ni la evolución darwinista procede de

REDES DE GENOTIPOS

Muchas secuencias, una función

Hoy sabemos que las redes de proteínas que postulaba Maynard Smith se encuentran relacionadas con el concepto de red de genotipos. Al contrario de lo que se pensó durante mucho tiempo, una proteína (o, en términos más generales, un fenotipo o una función biológica) no está asociada a una única secuencia de ADN. Antes bien, un gran número de secuencias distintas pueden dar lugar a la misma proteína. Todas las secuencias de una longitud dada que codifican la misma proteína pueden considerarse nodos de una red.



manera completamente errática. En su lugar, lo hace a través de una elegante estructura subyacente que, de manera natural, explica cómo innovan los organismos sin perder su funcionalidad biológica. En otras palabras, cómo cambia la vida sin perderse en un océano casi infinito de posibilidades sin sentido.

REDES Y FENOTIPOS

El Proyecto Genoma Humano, comenzado en 1990, tenía como objetivo determinar la secuencia de bases (adenina, A; citosina, C; guanina, G; y timina, T) que componen el ADN de *Homo sapiens*. La idea partía de la premisa tácita, asumida por la teoría evolutiva, de que las instrucciones para desarrollar un individuo estaban unívocamente definidas por dicha secuencia, y de que esta nos permitiría conocer el origen de enfermedades, características físicas, rasgos de carácter y toda otra particularidad humana. La impronta que este proyecto y otros semejantes han dejado es duradera, ya que casi treinta años después resulta inevitable visualizar genes y genomas como secuencias de letras tomadas de un alfabeto de cuatro símbolos que, tras una lectura adecuada por parte de la maquinaria celular, desembocarán en los procesos bioquímicos que posibilitan la vida. Sin embargo, la realidad es otra: la secuencia obtenida sirve solo como modelo para cartografiar la posición de los genes y una de sus posibles secuencias en el contexto del resto del genoma. Y es que, tal y como predecía la teoría neutralista, el gen encargado de codificar una determinada proteína puede tener todo un abanico de secuencias distintas.

Las observaciones de Kimura y todos los estudios posteriores sobre variabilidad genética han corroborado este principio fundamental: muchas secuencias distintas pueden dar lugar a la misma proteína (o al mismo fenotipo, en un sentido más amplio). Cuando esto ocurre hablamos de «degeneración»; es decir, de la imposibilidad de determinar de manera unívoca la secuencia, o genotipo, si observamos solo la función que finalmente se expresa, o fenotipo.

Gran parte de nuestro conocimiento actual sobre la relación entre genotipo y fenotipo tiene su origen en los trabajos realizados a finales del siglo pasado por Peter Schuster, de la Universidad de Viena. A finales de los años ochenta, su grupo inició un estudio computacional exhaustivo sobre la correspondencia entre secuencias de ARN y sus respectivas «estructuras secundarias», o configuración espacial. Las moléculas de ARN también constan de secuencias de cuatro bases (A, C, G y U, por uracilo, en lugar de la timina del ADN) que adoptan espontáneamente conformaciones plegadas como resultado de las distintas afinidades entre nucleótidos. Este modelo sencillo permite elaborar listas de secuencias que se pliegan en una estructura determinada. Decimos que dos secuencias de esa lista son mutuamente accesibles si difieren en una única letra, un cambio que en genética se conoce como mutación puntual y que es intrínseco al proceso replicativo natural de copia con errores. Si, como resultado de esa mutación, la estructura secundaria de la molécula no cambia, se trata de una mutación neutra, como las que postulaba Kimura.

A partir de aquí podemos definir uno de los conceptos clave en el estudio de la relación entre secuencias y fenotipos: el de red de genotipos. Todas las secuencias genéticas que dan lugar a la misma estructura secundaria (o, en general, a la misma proteína o al mismo fenotipo) se consideran miembros de la misma red. Cada nodo de esa red corresponde a una secuencia, y dos nodos quedarán enlazados si sus secuencias respectivas se diferencian en una única letra. Dada una secuencia, o nodo, el número de nodos con los que esta enlaza será, en general, variable. En teoría de redes dicho número se conoce como «grado», y en biología representa la robustez de la secuencia: esta será tanto más resistente a mutaciones cuanto mayor sea su grado, ya que entonces habrá más posibilidades de que una mutación aleatoria la lleve a otro nodo de la red, por lo que no tendrá efectos sobre la función que expresa.

El modelo que asigna a cada secuencia de ARN una estructura secundaria fragmenta el espacio de genotipos (entendido como el de todas las secuencias posibles de una longitud dada) en un conjunto de redes, tantas como estructuras secundarias sean posibles. Es difícil hacerse una idea fiel de la compleja arquitectura del espacio así fragmentado y de las relaciones de proximidad entre las distintas redes. Observemos que, siendo el alfabeto de cuatro letras, cada secuencia de N nucleótidos estará conectada con hasta $3N$ secuencias mutantes, algunas pertenecientes a la misma red y otras a redes distintas. En este segundo caso, una simple mutación puntual implicará pasar de una red a otra y se producirá un cambio en el fenotipo. Pero, si las mutaciones son del primer tipo y simplemente recorren los nodos de una misma red, a medida que se produzcan irá cambiando el conjunto de los fenotipos a los que se puede acceder. Por tanto, la diversidad de estructuras accesibles aumentará gradualmente según la cadena de ARN vaya recorriendo los nodos de la red. En otras palabras: la incorporación de mutaciones neutras, sin efectos en la función, permite a la molécula «acercarse» a fenotipos distintos, a nuevas funciones. En definitiva, permite que la evolución pueda explorar sin perder la función.

ARQUITECTURA NAVEGABLE

El de ARN fue el primero de los modelos que se emplearon para estudiar las redes de genotipos, pero no es el único. Los hay que modelizan la agregación molecular, la regulación y el metabolismo celular, los factores de transcripción de genes, etcétera. Todos ellos tienen en común un genotipo definido por una secuencia de símbolos y la existencia de muchos genotipos asociados a un mismo fenotipo. La conclusión más interesante que arroja su estudio es que todas estas redes, con independencia de su naturaleza, comparten una arquitectura común.

En primer lugar, el tamaño de dichas redes abarca muchísimos órdenes de magnitud. La mayoría de las redes son pequeñas e incluso muy pequeñas. Sin embargo, existen también redes enormes, las cuales contienen una inmensidad de genotipos; tantos que, de hecho, esas pocas redes de gran tamaño comprenden casi todos los genotipos posibles. En 2017, los autores de este artículo hallamos que la variable «logaritmo del tamaño» se distribuye según una campana de Gauss. Las redes más grandes se encuentran en la cola derecha de esa distribución, por lo que los fenotipos asociados constituyen una fracción minúscula del total de fenotipos posibles. No obstante, dichos fenotipos

ESPACIO DE GENOTIPOS

Red de redes

La existencia de redes de genotipos fragmenta el espacio de secuencias genéticas posibles. En este esquema simplificado, cada color representa una red, asociada a su vez a un fenotipo distinto. El tamaño de dichas redes es muy heterogéneo: aunque la mayoría son pequeñas (*tonos rojizos*), casi todos los nodos pertenecen a unas pocas redes de gran tamaño (*tonos verdes*). Como consecuencia, esos serán los fenotipos que aparecerán con mayor frecuencia durante el proceso evolutivo (*gráfica*).

Cada red (*color*) expresa un fenotipo distinto

La mayoría de las redes son pequeñas

Unas pocas redes gigantes contienen la mayoría de los genotipos

Inaccesible a la evolución

Accesible a la evolución

Distribución de redes (fenotipos)

Distribución de nodos (genotipos)

Probabilidad

10^{20} 10^{25} 10^{30} 10^{35} 10^{40} 10^{45} 10^{50}

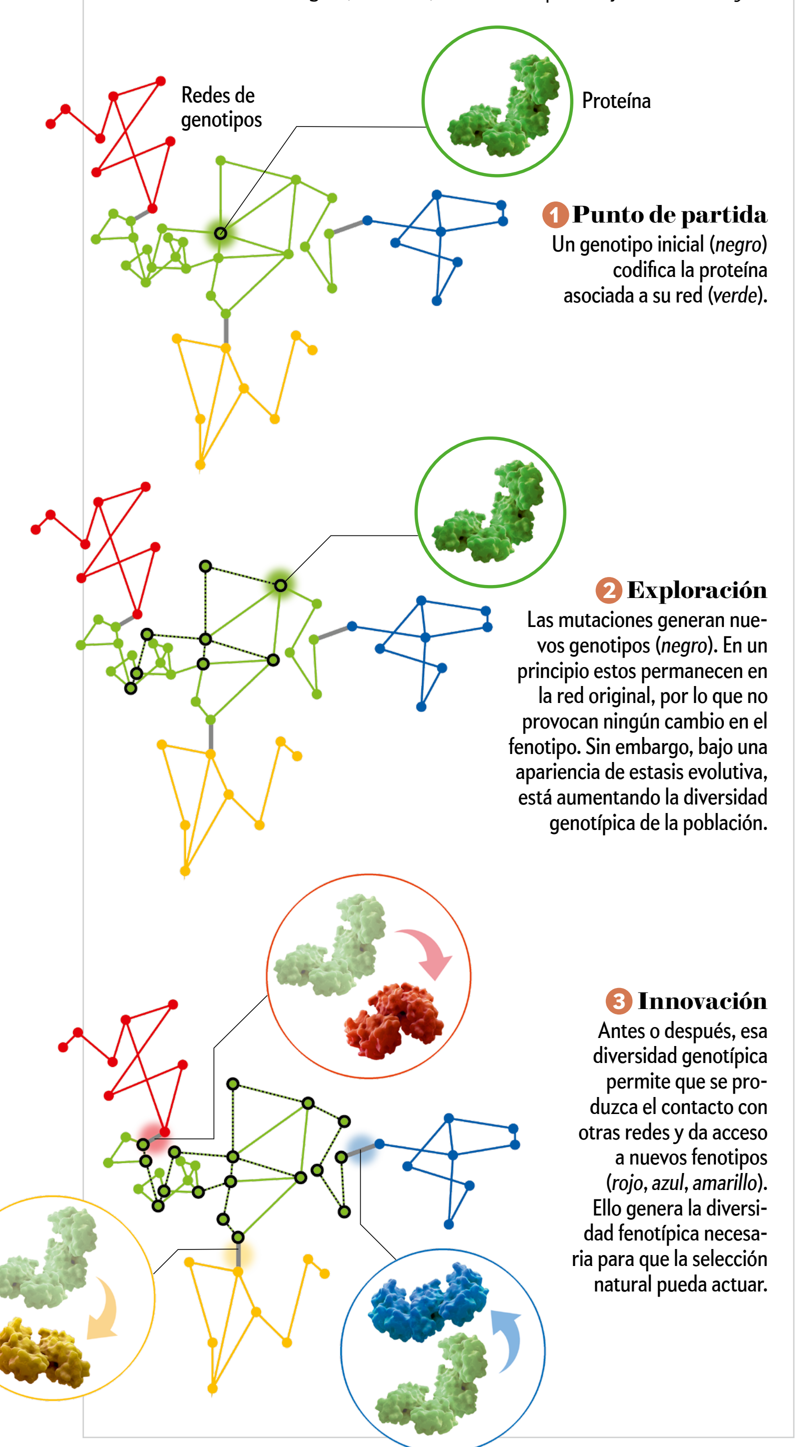
Tamaño de la red (número de nodos)

La evolución ve solo los fenotipos asociados a las redes más grandes. Las gráficas superiores muestran la distribución de fenotipos para el caso de moléculas de ARN de 100 nucleótidos. Si escogemos al azar un fenotipo (una red) de entre todos los posibles, la probabilidad de que tenga un tamaño dado queda representada por la curva roja. Esta implica que el tamaño de una red «típica» asciende a unos 10^{31} nodos. Sin embargo, esas no son las redes más abundantes en la naturaleza. Si tomamos al azar un genotipo (un nodo), la probabilidad de que este pertenezca a una red de tamaño determinado viene dada por la curva verde, en la que el fenotipo más frecuente es muchísimo mayor (unos 10^{41} nodos). Así pues, a lo largo de un proceso evolutivo caracterizado por mutaciones puntuales, la probabilidad de encontrar un fenotipo de tamaño inferior al que marca la línea vertical será insignificante. Aunque posibles en principio, todos los fenotipos que quedan por debajo de dicha línea son invisibles a la evolución.

CONEXIONES ENTRE REDES

Así innova la evolución

En los últimos años, varios estudios han demostrado que las redes de genotipos funcionales están conectadas entre sí. Dado un genotipo perteneciente a una red de gran tamaño (1), la mayoría de las mutaciones lo llevarán a otro nodo de la misma red, en cuyo caso el fenotipo se mantendrá intacto (2). Sin embargo, hay ocasiones en las que una mutación puntual puede provocar el salto de una red a otra, lo que generará un cambio en el fenotipo (3). Esta conexión entre redes permite que la evolución encuentre nuevas soluciones adaptativas sin pérdida de funcionalidad biológica; es decir, resuelve la paradoja de Salisbury.



comprenden un número enorme de genotipos, ya que están asociados a las redes más extensas de todas. Otro aspecto interesante es que el grado medio de una red (el número medio de enlaces por nodo, lo que da una idea de su robustez frente a mutaciones) crece logarítmicamente con el número de nodos, algo que hemos demostrado en el caso del ARN y que se ha comprobado numéricamente en multitud de modelos. Así pues, las redes más grandes proporcionan, además, los fenotipos más robustos.

Para fijar ideas, consideremos un ejemplo concreto. Las ribozimas son moléculas catalizadoras que, a diferencia de las enzimas más comunes, que son proteínas, están formadas por una cadena de ARN. Las ribozimas suelen tener una longitud de entre 40 y 160 nucleótidos. Tomando un valor representativo de 100 nucleótidos, obtenemos un total de $4^{100} \approx 10^{60}$ genotipos posibles. Un cálculo combinatorio complicado pero factible permite demostrar que todos esos genotipos se organizan en unas 10^{24} estructuras secundarias distintas. Estas cifras arrojan un promedio de $10^{60}/10^{24} = 10^{36}$ genotipos por fenotipo, o nodos por red. Sin embargo, la enorme heterogeneidad en el tamaño de estas redes hace que ese número sea muy poco representativo. De hecho, si escogemos un genotipo al azar, lo más probable será que forme parte de una red de unos 10^{40} nodos. Por su parte, las redes más pequeñas apenas contienen un puñado de nodos, mientras que la mayor de todas comprende unos 10^{51} genotipos: un número enorme, sin duda (¡quince órdenes de magnitud por encima del valor promedio y once por encima del tamaño más habitual!), aunque harían falta mil millones de tales redes para cubrir todo el espacio de genotipos posibles. Nótese que el abanico de tamaños que abarcan las redes de genotipos recorre la fabulosa cifra de 51 órdenes de magnitud: un uno seguido de 51 ceros. Por último, el 99 por ciento de todos los genotipos posibles se concentra en menos del 2 por ciento de las redes de mayor tamaño.

Retomemos en este contexto la paradoja de Salisbury. Una red como las mencionadas, formada por 10^{40} genotipos, ocupa una fracción 10^{-20} del espacio total de $4^{100} \approx 10^{60}$ genotipos. Por tanto, si las secuencias asociadas a ese fenotipo se distribuyesen de manera aleatoria, hallar una sería extremadamente improbable: para encontrarla a partir de una «ribozima de partida», harían falta unas 1000 mutaciones por segundo desde que comenzó la vida en la Tierra. Y aun suponiendo que diéramos con tal secuencia, dado que solo hay 300 secuencias en su vecindad (es decir, a distancia de una mutación), la probabilidad de que una de ellas conservase el fenotipo apenas sería mayor. Así pues, cualquier mutación haría que perdiéramos el fenotipo, cuyas secuencias asociadas no serían más que islas minúsculas extraviadas en un océano inconmensurable. En esta situación, la generación de diversidad manteniendo la función se antoja imposible. ¿Qué estamos pasando por alto?

La paradoja de Salisbury contiene la premisa implícita de que las secuencias viables se reparten de manera azarosa por el espacio de genotipos. Sin embargo, esto no es cierto ni para los genotipos de una red ni para las palabras de un idioma. El diccionario usado por la Asociación Americana de Jugadores de Scrabble da

un total de 4214 palabras de cuatro letras con significado. Sin embargo, el número total de secuencias de cuatro caracteres que podemos formar con un alfabeto de 26 letras es de $26^4 = 456.976$. Si las palabras con significado se repartieran al azar en este último conjunto, la probabilidad de que una de ellas tuviera a su vez una vecina con significado sería demasiado pequeña y el juego de la escalera perdería su gracia. Pero la experiencia nos indica que no ocurre así, ya que ni las palabras de un idioma ni los genotipos viables se distribuyen al azar: unas y otros están fuertemente correlacionados. En el caso de las palabras resulta fácil ver por qué. Por ejemplo, aquellas que contienen vocales o cuya pronunciación se ajusta a las reglas del idioma contarán con una probabilidad mucho mayor de tener significado. De manera similar, las correlaciones existentes entre los genotipos cercanos y los fenotipos que producen garantizan, entre otras propiedades de gran interés desde el punto de vista evolutivo, la navegabilidad de los espacios de secuencias.

A nivel molecular la naturaleza no está dominada por los fenotipos óptimos, sino por aquellos más abundantes, con tal de que sean funcionales en grado suficiente

Todo lo anterior implica una propiedad fundamental: a base de mutaciones puntuales, una secuencia puede cambiar hasta no compartir con la inicial más posiciones que las que tendría una secuencia escogida al azar. Sin embargo, todos esos cambios pueden producirse perfectamente sin abandonar en ningún momento la red, de modo que el fenotipo queda intacto. De esta manera, cada red estará en contacto con un número enorme de otras redes, por lo que en la práctica debería ser posible acceder a un fenotipo desde casi cualquier otro por algún punto de su red de genotipos. Esto abre a la evolución molecular unas posibilidades enormes de explorar innovaciones sin por ello tener que sacrificar la funcionalidad. Y lo hace, además, a pesar de que las secuencias que generan fenotipos viables resulten muy raras en el espacio total de genotipos.

LO QUE VE LA EVOLUCIÓN

Richard Dawkins, reconocido biólogo evolutivo y eminente divulgador, autor del éxito editorial *El gen egoísta* y en la actualidad profesor emérito de la Universidad de Oxford, relata en su libro *El relojero ciego* una ilustrativa experiencia de navegación por un espacio de genotipos. En los años ochenta, Dawkins dedicó un tiempo al estudio de «biomorfos», criaturas digitales definidas por un conjunto de reglas informáticas simples, con capacidad de cambiar (mutar) y de generar formas semejantes a ondas, plantas, insectos o caracolas. Los genotipos subyacentes, codificados en secuencias de números, producían una enorme diversidad de fenotipos, y cambios menores podían desembocar en grandes modificaciones del biomorfo asociado.

En una de sus simulaciones, Dawkins dio con cierta clase de «insectos» de aspecto singular. Sin embargo, la versión del código que estaba utilizando no registraba el detalle de los genotipos. En esa primera aparición de sus hermosos insectos no pudo, pues, analizar las reglas que los definían. La pérdida se convirtió en obsesión. Según explica el mismo Dawkins en su libro: «Me dispuse a tratar de encontrarlos de nuevo. Habían evolucionado una vez, por lo que parecía posible que emergieran de nuevo. Como el acorde perdido, me obsesionaron. Deambulé por la Tierra de los Biomorfos, moviéndome por un paisaje infinito de extrañas criaturas y objetos, pero no pude encontrar a mis insectos. Sabía que debían estar al acecho en alguna parte. Conocía los genes a partir de los cuales había comenzado la evolución original. Tenía una foto de mis insectos. Incluso conocía la secuencia evolutiva de los cuerpos que conducían a ellos en pequeños pasos desde su ancestro, un simple punto. Pero no conocía la fórmula genética».

Esta anécdota ilustra dos de los atributos fundamentales de los espacios de genotipos. Uno es el astronómico número de caminos posibles que hay en espacios de alta dimensión: tantos que la probabilidad de reproducir uno concreto empezando en el mismo sitio es básicamente cero. El otro es la práctica imposibilidad de dar con fenotipos poco probables; esto es, con aquellos cuya red de genotipos asociada es pequeña, como parecía ser el caso de los insectos de Dawkins. Ambos aspectos resultan determinantes para comprender la dinámica evolutiva y el proceso adaptativo.

Hoy contamos con bastantes pruebas que sugieren que todas las funciones moleculares que se dan en la naturaleza corresponden a fenotipos cuya red de genotipos es grande. En un trabajo publicado en 2015, el físico de la Universidad de Oxford Ard A. Louis y sus colaboradores estudiaron el tamaño de las redes asociadas a moléculas funcionales de ARN que no codifican genes. Entre ellas encontramos ribozimas, micro-ARN, algunos virus satélite, etcétera, y sus tamaños oscilan entre 20 y 130 nucleótidos. En estas moléculas la estructura secundaria es de vital importancia para definir la función. Los investigadores observaron que esas redes tenían tamaños muy superiores al valor esperado para secuencias de su longitud.

Por ejemplo, para secuencias de 100 nucleótidos, las redes que se observan en la naturaleza están formadas por entre 10^{35} y 10^{47} secuencias, siendo el tamaño de las más abundantes 10^{41}. Sin embargo, el tamaño esperado de una red «típica» en este espacio es del orden de 10^{31}: 10.000 veces menor que el de las redes naturales más pequeñas. Ese número podrá parecer grande en términos absolutos, pero palidece en comparación con el tamaño de las redes naturales. Así pues, a todos los efectos, los fenotipos asociados a redes pequeñas resultan inaccesibles a las búsquedas ciegas del proceso evolutivo.

Para entender esta preferencia de la naturaleza por los fenotipos asociados a las redes de mayor tamaño, hemos de tener en cuenta varias cosas. En primer lugar, las redes más grandes ocupan casi todo el espacio de genotipos: como mencionábamos más arriba, para secuencias de 100 nucleótidos, el 2 por ciento de las redes de mayor tamaño concentra el 99 por ciento de todos los genotipos posibles, por lo que resulta muy fácil dar con ellas. En segundo lugar, esas mismas redes tienen más conexiones entre sí, lo que introduce un sesgo extra hacia ellas a medida que la evolución explora posibilidades. En tercer lugar, estas redes son también más robustas, ya que, como hemos visto, el número medio de enlaces por nodo crece con el tamaño de la red, lo que las hace más resistentes a mutaciones. Y por último, pese a que son una minoría, el número absoluto de redes grandes sigue siendo astronómicamente elevado. En el caso de

¿Un nuevo paradigma evolutivo?

Las redes de genotipos proporcionan un nuevo marco que ilustra cómo y por qué tiene lugar la evolución molecular. Este nuevo paradigma modifica significativamente el anterior, basado en la genética de poblaciones, y da explicaciones distintas a varios fenómenos que se creían entendidos, al tiempo que aclara otros que hasta ahora no se comprendían bien.

Por ejemplo, la teoría proporciona un nexo entre las visiones adaptacionistas y neutralistas de la evolución, las cuales llevan en pugna desde que Kimura propusiera la segunda. Estos dos puntos de vista defienden que uno de los dos procesos (ya sea la selección y adaptación, ya sea la deriva neutra y la prevalencia de mutaciones sin valor adaptativo) domina la evolución. La dinámica sobre redes de genotipos permite cuantificar qué peso tiene cada uno de ellos en la dinámica evolutiva y, sobre todo, muestra que uno y otro no constituyen visiones contrapuestas, sino complementarias, ya que ambos resultan imprescindibles para entender la evolución.

Las redes de genotipos también permiten explicar la estasis que se observa en los procesos evolutivos: largos períodos durante los cuales el fenotipo apenas cambia, puntuados por episodios de cambios drásticos. Como han demostrado empíricamente los datos genómicos de la evolución de la gripe, entre otros, la teoría muestra cómo bajo la apariencia estática de un fenotipo estable, en realidad está aumentando la diversidad genética de una población en busca de nuevas soluciones adaptativas. Otros problemas conocidos desde hace tiempo por los expertos, como las anomalías en el reloj molecular o la asimilación genética de Waddington, también resultan sencillos de explicar en este nuevo marco teórico.

No obstante, y a pesar de los avances logrados en los últimos años por varios grupos de todo el mundo, no puede decirse que las redes de genotipos hayan alcanzado el estatus de consenso en evolución molecular. Creemos que ello se debe en parte a que esta teoría es matemática y conceptualmente más compleja que el paradigma imperante, lo que puede haber dificultado su aceptación por parte de un sector de la comunidad. No en vano, esta descripción nunca habría sido posible sin las herramientas y conceptos desarrollados en otras áreas y disciplinas, como la teoría de redes, la teoría de la complejidad, el estudio de transiciones críticas, la física de los sistemas no lineales o la mecánica estadística.

¿Qué avances podemos esperar en los próximos años? La pregunta fundamental es cómo debemos reformular la teoría evolutiva en este contexto. Una cuestión específica de gran interés es la posibilidad de predecir la evolución, o cuán restringidos están los posibles caminos evolutivos. Otra será aclarar la relación entre entorno y evolución, o la adaptación de los virus y los microorganismos, una pregunta fundamental ante cambios ambientales.

las secuencias de 100 nucleótidos, ese 2 por ciento de las redes de mayor tamaño comprende unos 10^{22} fenotipos. En otras palabras: entre las redes grandes hay una diversidad de fenotipos más que suficiente para que la evolución encuentre la solución adecuada a cada situación.

La conclusión que se desprende de esto es tal vez sorprendente: a nivel molecular, la naturaleza no está dominada por los fenotipos óptimos, sino por aquellos más abundantes, con tal de que sean funcionales en grado suficiente.

REDES NATURALES E INNOVACIÓN EVOLUTIVA

Si la intuición de Maynard Smith sobre la posibilidad de variación sin pérdida de funcionalidad era correcta, y si los resultados obtenidos con modelos simplificados, como los de ARN, reflejan las propiedades de las moléculas naturales, deberíamos ser capaces de encontrar versiones moleculares de la escalera de palabras. Esto es, tendría que ser posible enlazar las secuencias de dos moléculas reales a través de una cadena de mutaciones puntuales que llevara de una a otra sin que en ningún momento se perdiera la funcionalidad.

Este fue el reto que hacia el año 2000 se plantearon Erik A. Schultes y David P. Bartel, del Instituto de Tecnología de Massachusetts. Para llevar a cabo su experimento, eligieron como punto de partida dos secuencias de ARN correspondientes a funciones distintas. Una era una ribozima autocatalítica con función ligasa obtenida mediante evolución artificial en el laboratorio; la segunda era una ribozima natural derivada de un virus de la hepatitis. Sus secuencias, formadas por 88 nucleótidos, no se parecían más que las de cualquier par de moléculas de dicha longitud escogidas al azar. Los investigadores hallaron que el lugar de encuentro de las dos redes se daba en una «secuencia de intersección» situada a algo más de 40 mutaciones de cada una de las secuencias originales. Y además comprobaron que, efectivamente, existía una escalera de secuencias que llevaba desde la intersección hasta cada uno de los genotipos iniciales sin que la función original se perdiese en ningún momento: las redes estaban en contacto.

La existencia de redes de genotipos resulta fundamental para que se produzca innovación funcional en las proteínas, al menos en las de ciertos virus. Un estudio publicado en 2006 y dirigido por Mercedes Pascual, por entonces en la Universidad de Michigan, analizó el cambio en el genoma y la patogenicidad del virus de la gripe A durante cuatro décadas. Una de las proteínas del virus, la hemaglutinina (HA), es la que desencadena la respuesta del sistema inmunitario ante la infección. Su trabajo halló que, aunque el gen que codifica la HA cambia de manera gradual, las propiedades antigénicas del virus (la respuesta inmunitaria que induce) se modifican de manera brusca.

Estas observaciones coinciden con nuestra experiencia. La vacuna de la gripe nos protege durante una estación, cuando las propiedades del virus no cambian sustancialmente. Pero al año siguiente debemos vacunarnos de nuevo, ya que para entonces el virus se ha modificado tanto que lo que nuestro sistema inmunitario «aprendió» ya no nos protege: ha aparecido un nuevo fenotipo dominante. ¿Qué le sucede a la población de virus a lo largo de las estaciones?

Pascual y sus colaboradores dieron con la respuesta. Observaron que la diversidad de secuencias que codificaban la HA aumentaba a lo largo de cada estación. Es decir, a medida que la epidemia avanza, el número de secuencias distintas crece. Las mutaciones acumuladas durante una estación son neutras con respecto de las propiedades antigénicas, por lo que ese fenotipo no cambia y seguimos siendo inmunes. Pero con ellas la población de virus explora regiones cada vez mayores de la

red de genotipos. Al final de la estación de gripe, una fracción importante de los individuos ha adquirido inmunidad frente a la variedad circulante del virus. Pero la diversidad lograda durante la acumulación de mutaciones neutras permite que el patógeno acceda a algún fenotipo nuevo que nuestro sistema inmunitario ya no reconocerá. En general, el salto a una red de genotipos distinta, con un fenotipo mejor adaptado al entorno, se hace a través de un nodo específico: el de la primera secuencia que se encuentra con el nuevo fenotipo. Ello causa una importante reducción en la diversidad de la población, puesto que los genotipos del fenotipo antiguo, peor adaptado, estarán en desventaja frente a los (pocos) genotipos que inicialmente expresan el nuevo fenotipo. A partir de ese momento, el proceso de acumulación de mutaciones neutras y la exploración de la nueva red se repite. Lo hace hasta que el número de individuos inmunes a la nueva cepa es tal que el número de infecciones se reduce demasiado, lo que fuerza la selección de otro fenotipo. Y así estación tras estación.

Hasta el momento no se han llevado a cabo experimentos semejantes al de Schultes y Bartel usando proteínas. Y dado que no se conoce ninguna proteína capaz de plegarse en dos estructuras distintas, se piensa que puede haber dificultades para conseguirlo. Sin embargo, en un trabajo reciente publicado junto con Pablo Catalán, de la Universidad de Exeter, y Andreas Wagner, de la de Zúrich, hemos demostrado que la falta de conectividad en las redes de proteínas queda paliada —y deja de ser tal— a medida que añadimos niveles de complejidad a la relación genotipo-fenotipo: por ejemplo, las múltiples interacciones entre proteínas, las redes reguladoras que emergen de estas o las reacciones metabólicas. Una representación multinivel del fenotipo resulta más difícil de tratar, pero es sin duda más realista. En último término, creemos que la complejidad jerárquica de la relación entre genotipo y fenotipo podría ser la responsable de la capacidad intrínseca de los sistemas vivos para evolucionar e innovar.

LA BIBLIOTECA DE BABEL

Uno de los relatos más célebres de Jorge Luis Borges, *La biblioteca de Babel*, comienza de la siguiente manera:

> *El universo (que otros llaman la Biblioteca) se compone de un número indefinido, y tal vez infinito, de galerías hexagonales...*

En él se describe una biblioteca formada por volúmenes de idéntico tamaño, cada uno de 410 páginas, con 40 renglones por página y 80 caracteres por renglón, lo que da un total de 1.312.000 caracteres por libro. Las obras están compuestas en un alfabeto de 25 símbolos y comprenden todas las combinaciones posibles, por lo que el número de volúmenes en la biblioteca, al que denominaremos «número de Borges», asciende a $25^{1.312.0000} \approx 10^{1.834.097}$. Se trata de una cifra con 1.834.097 dígitos: una cantidad descomunal, «hiperastronómica», ya que en todo el cosmos no existe nada remotamente parecido. Se estima que el número de partículas elementales en el universo observable asciende a 10^{80}, una cantidad que no representa nada frente al número de Borges.

Sin embargo, incluso la cifra concebida por el escritor argentino palidece en comparación con el tamaño de los espacios genómicos comunes. El nematodo *Pratylenchus coffeae*, un patógeno de vegetales como la patata, el plátano, la fresa o el limón, tiene un genoma de unos 20 millones de pares de bases, por lo que el número de genomas distintos de dicha longitud asciende a $4^{20.000.000} \approx 10^{12.000.000}$. Y el genoma humano posee 3200 millones de pares de bases, con lo que la magnitud de su espacio de genotipos resulta sencillamente inimaginable. Borges parece evocar la paradoja de Salisbury cuando escribe:

> *Como todos los hombres de la Biblioteca, he viajado en mi juventud; he peregrinado en busca de un libro, acaso del catálogo de catálogos; ahora que mis ojos casi no pueden descifrar lo que escribo, me preparo a morir a unas pocas leguas del hexágono en que nací.*

Y es que, en efecto, ni la vida del universo bastaría para recorrer más que una ínfima parte de semejante vastedad. Recorrido infructuoso, por otra parte, ya que no hay correlación entre volúmenes adyacentes de la biblioteca.

El éxito de la búsqueda de significado, entendido como la función robusta, persistente pero flexible, ha sido muy otro en los sistemas biológicos. El hecho de que podamos reconstruir la historia de los genes indica que no hubo que explorar en exceso, puesto que, simplificando un tanto, cada conjunto de funciones en los organismos celulares actuales puede retrotraerse hasta un origen común. La señal que guardan nuestros genomas de los ancestros compartidos indica una suma de felices «accidentes congelados», los cuales han bastado para diversificarse, modularse a través de mutaciones que no han conseguido borrar el recuerdo de su origen y, finalmente, conducir a la maravillosa biodiversidad de nuestro planeta.

La evolución ha trabajado con lo que encontró, y eso ha sido suficiente. Desearíamos poder explorar nuestra biblioteca particular, el espacio de todos los organismos posibles, pero esa ambición está completamente fuera de nuestro alcance y lo estará por siempre. Pensemos que quizá no importa, puesto que todo indica que lo probable y lo funcional se halla muy cerca de cualquiera de los genotipos y fenotipos que la evolución ya ha encontrado. IyC

PARA SABER MÁS

The strange inevitability of evolution. Philip Ball en *Nautilus*, n.º 20, enero de 2015. Disponible en **nautil.us/issue/20/creativity/the-strange-inevitability-of-evolution**

The structure of the genotype–phenotype map strongly constrains the evolution of non-coding RNA. Kamaludin Dingle, Steffen Schaper y Ard A. Louis en *Interface Focus*, vol. 5, art. 20150053, diciembre de 2015.

Contingency, convergence and hyper-astronomical numbers in biological evolution. Ard A. Louis en *Studies in History and Philosophy of Biological and Biomedical Sciences*, vol. 58, págs. 107-116, agosto de 2016.

Distribution of genotype network sizes in sequence-to-structure genotype-phenotype maps. Susanna Manrubia y José A. Cuesta en *Journal of the Royal Society Interface*, vol. 14, art. 20160976, abril de 2017.

Adding levels of complexity enhances robustness and evolvability in a multilevel genotype–phenotype map. Pablo Catalán et al. en *Journal of the Royal Society Interface*, vol. 15, art. 20170516, enero de 2018.

On the networked architecture of genotype spaces and its critical effects on molecular evolution. Jacobo Aguirre et al. en *Open Biology*, vol. 8, art. 180069, julio de 2018.

EN NUESTRO ARCHIVO

Metabiología: Los orígenes de la creatividad biológica. Gregory Chaitin, Virginia M. F. G. Chaitin y Felipe S. Abrahão en *IyC*, enero de 2014.

La teoría neutralista de la evolución molecular, medio siglo después. Antonio Barbadilla, Sònia Casillas y Alfredo Ruiz en *IyC*, febrero de 2019.

por Jonatan Rodríguez, Adolfo Cordero-Rivera, Luís González

Plantas invasoras que favorecen las plagas de insectos

Al alterar la estructura y la composición de los ecosistemas, las plantas exóticas facilitan la proliferación de insectos herbívoros dañinos

Las plantas invasoras, especies exóticas que han sido introducidas de forma fortuita o intencionada en ecosistemas autóctonos, son una de las principales amenazas para la conservación de la naturaleza en todo el mundo. Muchas de ellas forman densas masas uniformes que alteran los hábitats y provocan una pérdida de biodiversidad. No solo modifican las características fisicoquímicas del medio, como la temperatura y la luz, y los nutrientes y la humedad del suelo; también alteran la composición y la estructura de las comunidades microbianas del suelo, la relación de las plantas con los consumidores primarios (los herbívoros) y, como consecuencia, la de estos con los depredadores. En general, interrumpen muchas de las interacciones existentes entre las especies autóctonas.

Cuando una planta con potencial invasor se introduce en una región distinta a su área de distribución, suele diseminarse con rapidez, sobre todo porque se ve liberada de sus enemigos naturales. Sin embargo, nuestros últimos estudios indican que no siempre sucede así: algunas plantas invasoras adquieren nuevos enemigos en la región que acaban de colonizar. Pero ¿llegan estos a ejercer un control efectivo sobre las invasoras?

En Galicia hemos comprobado que a menudo no lo consiguen. Es más, varios herbívoros invertebrados se están expandiendo a costa de ellas, que les proporcionan alimento y hábitat. Algunos son insectos responsables de plagas y otros son vectores de virus o bacterias que se transmiten entre plantas. La cigarra espumadora (*Philaenus spumarius*) funciona como vector de *Xylella fastidiosa*, una bacteria que amenaza a múltiples cultivos, entre ellos los olivos. Dos plantas invasoras, ambas introducidas en Europa hace más de un siglo, son huéspedes de este insecto: la mimosa (*Acacia dealbata*), originaria de Australia y Tasmania, y la uña de gato (*Carpobrotus edulis*), originaria de Sudáfrica. Ello supone un riesgo para los cultivos colindantes. Nuestros resultados, publicados en *Biological Invasions*, indican que deben tomarse medidas de conservación en los ecosistemas autóctonos para evitar que los daños se intensifiquen a causa de las plagas.

—Jonatan Rodríguez,
—Adolfo Cordero-Rivera,
—Luís González,
Universidad de Vigo

TODAS LAS ILUSTRACIONES SON DE JONATAN RODRÍGUEZ



LA MIMOSA es una planta invasora que a menudo forma masas que dominan el paisaje, como esta de la localidad de Mos, en Pontevedra.

Si eres investigador en el campo de las ciencias de la vida y la naturaleza, y tienes buenas fotografías que ilustren algún fenómeno de interés, te invitamos a participar en esta sección. Más información en **www.investigacionyciencia.es/decerca**





LA INVASORA UÑA DE GATO favorece en la costa gallega la propagación de la cigarrilla verde (*Cicadella viridis*), que se alimenta de su sabia (*arriba*). De sus flores se nutre, además, el caracol blanquillo de las dunas (*Theba pisana, derecha*).





LAS MASAS DE MIMOSA atraen a la cigarrilla espumadora (*Philaenus spumarius*), que se alimenta de su sabia (*arriba*), así como al chinche verde (*Nezara viridula*), posado aquí en sus flores (*derecha*).

por David Kaiser



David Kaiser es catedrático de física y de historia de la ciencia en el Instituto de Tecnología de Massachusetts.

Imperios y Estados aliados con la ciencia

Los orígenes del apoyo gubernamental a la investigación

A finales de agosto de 1609, el astrónomo italiano Galileo Galilei describió vivamente en una carta al hermano de su mujer la rápida sucesión de acontecimientos de aquel verano. Apenas unas semanas antes, tras alcanzarle rumores sobre la invención de un anteojo en Flandes, Galileo había construido una versión mejorada que, a su vez, desencadenó nuevos rumores. El Senado de Venecia le pidió una demostración. Galileo alardeaba en su carta de que «muchos nobles y senadores» no habían dudado en «subir a los más altos campanarios de Venecia para avistar velas y buques tan lejanos que, sin el anteojo, no se hacían visibles sino horas después». El Senado le concedió inmediatamente una cátedra vitalicia en la Universidad de Padua, dotada con el respetable salario anual de 1000 florines.

Eso no era más que el principio. Galileo dirigió a continuación su telescopio al cielo y descubrió, entre otras cosas, cuatro lunas que orbitaban Júpiter. Las denominó astutamente Estrellas Mediceas en honor a Cósimo II de Médici, Gran Duque de la Toscana. La jugada funcionó: antes de que hubiera transcurrido un año desde que describiera en su carta el éxito alcanzado en Venecia, fue nombrado filósofo natural de la corte de los Médici en Florencia, un puesto mejor pagado y sin obligaciones docentes.

Galileo sabía cómo convencer a senadores y nobles para que apoyaran sus trabajos. Su habilidad para enlazar un benefactor con otro recuerda a la de los actuales emprendedores científicos. Sin embargo, una nueva relación entre ciencia y política empezó a forjarse en varias partes del mundo unos 250 años después.

La construcción de imperios

En las décadas centrales del siglo XIX, el Imperio británico se extendía sobre la cuarta parte de la superficie terrestre y ejercía su dominio sobre una cuarta parte de la población mundial. Destacados políticos británicos, entre los cuales se contaban antiguos y futuros primeros ministros, querían promover la ciencia y la tecnología. En la década de 1840, Robert Peel, Benjamin Disraeli y William Gladstone, entre otros, contribuyeron con fondos



MILITARES Y CIENTÍFICOS reunidos en una entrega de premios en 1945 en el laboratorio de Los Álamos, sede del proyecto Manhattan de desarrollo de armas nucleares. Las tres flechas rojas indican, de izquierda a derecha: J. Robert Oppenheimer (director del laboratorio), el mayor general Leslie Groves (director del proyecto) y Robert Gordon Sproul (presidente de la Universidad de California).

LABORATORIO DE LOS ÁLAMOS/WIKIMEDIA COMMONS/DOMINIO PÚBLICO

propios a la fundación del Colegio Real de Química, seguros de que la investigación en este campo beneficiaría a la nación. Dos decenios después, muchos investigadores se esforzaban por materializar este tipo de acuerdos. Numerosas universidades del Reino Unido construían laboratorios, con la confianza de que la medición precisa de las magnitudes físicas iba a impulsar el conocimiento científico y el desarrollo industrial.

La electrificación, la telegrafía, la expansión del ferrocarril y la producción a gran escala de acero caracterizan la segunda revolución industrial, que se inició hacia 1870. Cada uno de estos desarrollos requería unidades y medidas estándar. Investigadores como James Clerk Maxwell y William Thomson (lord Kelvin) aportaron sus conocimientos de electromagnetismo y termodinámica a las comisiones gubernamentales en las que participaban, creando nuevas sinergias para abordar los retos de las comunicaciones transatlánticas, los estándares de electricidad, la navegación oceánica y la energía del vapor.

Podría decirse que los británicos actuaban de forma reactiva. Desde mediados del siglo XIX, las universidades de los estados alemanes habían competido por el prestigio y el talento académicos. Eran instituciones financiadas por el Gobierno que intentaban captar a los Galileos de su tiempo. Este modo de actuar se intensificó en 1871, tras la derrota de Francia a manos de Prusia y la unificación de Alemania. El Gobierno alemán invirtió generosamente en la investigación científica a través de un nuevo Ministerio de Educación centralizado, con el ambicioso fin de impulsar una rápida industrialización.

Aun así, destacados empresarios como Werner von Siemens temían que Alemania perdiera su liderazgo. En 1887 se asociaron para promover la creación en Berlín de una nueva institución pública: el Instituto Físico-Técnico Imperial. Dirigido por el físico Hermann von Helmholtz, tenía por misión conectar la investigación básica con la investigación aplicada y el desarrollo industrial. En pocos años, la medición precisa de la energía radiada por distintos dispositivos, con el fin de evaluar sistemas de iluminación a gran escala, reveló una discrepancia entre el espectro de la radiación del cuerpo negro y las teorías físicas prevalentes. Esta anomalía hizo que el físico Max Planck rompiera con la teoría electromagnética de Maxwell y diera los primeros pasos tentativos hacia la teoría cuántica.

Entretanto, otra guerra con Prusia propició en 1867 la creación del Imperio austro-húngaro y nuevos cambios en la relación entre el Gobierno y la ciencia. Las autoridades imperiales emprendieron grandes proyectos de meteorología y climatología. Su intención era crear grandes redes institucionales que dieran cierta unidad al conglomerado de tradiciones legales, religiosas y lingüísticas. Universidades, museos y otras instituciones gubernamentales empezaron a recoger y estandarizar datos meteorológicos para comprender de qué manera los patrones locales estaban relacionados con los fenómenos a gran escala. La necesidad de unificar un vasto imperio impulsó la investigación sobre cuestiones que parecen muy actuales, como la interacción entre regiones o la relación entre fenómenos a diversas escalas, desde el microclima a los continentes.

En el siglo XIX se forjaron en el Reino Unido, la Europa continental y parte de Asia muchos de los elementos que caracterizan la ciencia contemporánea

En Rusia, el zar Alejandro II tenía su propio proyecto de modernización. En 1861 llevó a cabo la primera de una serie de grandes reformas. A la emancipación de los siervos le siguió la reforma del sistema público universitario, así como cambios en los Gobiernos regionales y el sistema judicial. La vasta burocracia resultante creó oportunidades para intelectuales ambiciosos, como el químico Dimitri Mendeléiev. Tras dos años de estudio en Heidelberg, Mendeléiev regresó a su San Petersburgo natal en 1861 para enseñar química en la universidad. En 1869 publicaría su célebre versión de la tabla periódica de los elementos.

La remarcable carrera de Mendeléiev revela los nuevos roles de la ciencia y la tecnología. Asesor del Ministerio de Finanzas y la Armada rusa, Mendeléiev acabó dirigiendo la Oficina Central de Pesos y Medidas, desde la cual contribuyó a la introducción en Rusia del sistema métrico decimal. Como Otto von Bismarck y otros artífices de la nación alemana, el zar Alejandro II impulsó el desarrollo industrial a lo largo y ancho del país, invirtiendo generosamente en las medidas de precisión. Contó para ello con la ayuda de científicos tan hábiles y dispuestos como Mendeléiev.

Japón experimentó profundos cambios en la misma década. La Restauración Meiji de 1868 conllevó la apertura de un país hasta entonces aislado. El juramento del emperador proclamaba que «se irá a la búsqueda del conocimiento por todo el mundo, para reforzar los cimientos del Gobierno imperial». El Gobierno reformó e invirtió en la industria manufacturera. Creó nuevas escuelas públicas y becas que posibilitaran la formación científica en el extranjero. Atrajo a científicos de países como el Reino Unido o Estados Unidos para que introdujeran la formación en las instituciones gubernamentales. También aquí los líderes políticos priorizaron los organismos de investigación apoyados por el Estado como parte de su modernización.

La irrupción de Estados Unidos

Estados Unidos parecía estar obstinadamente al margen. Los tiempos no eran propicios para nuevas inversiones. El conflicto más sangriento de la historia del país llegó a su fin en 1865, puntuado por el asesinato del presidente Abraham Lincoln. (Murieron más soldados estadounidenses en la guerra civil de 1861–65 que en la primera y la segunda guerras mundiales y las guerras de Corea, Vietnam, Afganistán e Iraq juntas.) El apoyo federal a la investigación y a las instituciones científicas fue escaso hasta finales del siglo XIX. Algunos líderes políticos se escandalizaron por la relativa falta de preparación científica y tecnológica ante la Primera Guerra Mundial.

Los esfuerzos reformistas para reforzar el apoyo gubernamental a la investigación chocaban con una tradición asentada que consideraba la educación un asunto de las autoridades locales y de los distintos estados, no del Gobierno federal. En todo el país, las universidades y otras instituciones de educación superior dedicaban cada vez mayor atención a la investigación original y se dotaban de laboratorios, con resultados desiguales. El físico Isidor Rabi, que en 1927 viajó a Alemania para estudiar teoría cuántica, constató en fecha tan tardía que las bibliotecas universitarias adquirían la revista estadounidense *The Physical Review* de año en año. No tenían ninguna razón para recibir los nú-

meros con mayor frecuencia, dados los contenidos poco relevantes de la revista. La ciencia fue en buena medida ignorada por el New Deal del presidente Franklin D. Roosevelt, que incrementó el poder del Gobierno federal durante la Gran Depresión de la década de 1930.

El Gobierno federal solo empezaría a prestar un apoyo masivo a la ciencia a principios de los años 1940, en plena movilización bélica. El radar, las armas nucleares, la espoleta de proximidad y decenas de proyectos militares requerían miles de millones de dólares y la coordinación de la investigación fundamental con las aplicaciones prácticas.

La efectividad del sistema de investigación y desarrollo bélico impresionó a políticos, militares y gestores universitarios por igual. Al llegar la paz, no perdieron tiempo en construir una nueva infraestructura capaz de mantener las relaciones forjadas durante la contienda. El presupuesto de las ciencias físicas y la ingeniería creció sin cesar a partir de 1945, con fondos casi exclusivamente federales. En 1949, el 96 por ciento de la investigación básica en física estaba financiada por agencias federales de carácter militar. En 1954, cuatro años después de la creación de la Fundación Nacional para la Ciencia, la proporción alcanzaba el 98 por ciento.

Los responsables de la política científica estadounidense dieron con nuevas razones para apoyar la investigación: ayudaba a alcanzar los objetivos domésticos de desarrollo industrial y defensa militar, y era un elemento fundamental de las relaciones internacionales. Creían también que la inversión federal en las instituciones científicas de una Europa devastada por la guerra impediría a los científicos de países como Francia, Italia o Grecia flirtear con el comunismo. La reforma a fondo del sistema universitario japonés, durante la ocupación de posguerra, contribuyó asimismo a la difusión del modelo estadounidense. Invertir en ciencia era invertir en los corazones y en las mentes.

En Estados Unidos, la continua inyección federal propició un crecimiento sin precedentes de la investigación y la infraestructura científicas. En los 25 años siguientes al fin de la Segunda Guerra Mundial, se formaron más científicos de los que se habían formado en toda la historia de la humanidad. El Gobierno desarrolló un sistema de laboratorios nacionales y financió la investigación universitaria en un frente muy amplio, con escasa conexión directa con proyectos militares. Los gastos se justificaban en términos de «preparación»: era necesario disponer de una gran reserva de personal cualificado, dispuesto a trabajar en proyectos militares si la Guerra Fría devenía una guerra convencional.

Entretanto, científicos emprendedores aprovecharon las oportunidades que les brindaba el patrocinio militar. El interés de la Armada estadounidense por la guerra submarina estimuló la exploración de los fondos oceánicos. Los geólogos contrastaron la tectónica de placas mediante nuevos datos e instrumentos [*véase* «El encaje de las placas tectónicas», por Naomi Oreskes; Investigación y Ciencia, agosto de 2014]. Los físicos que trabajaban en el desarrollo de misiles impulsaron nuevas áreas de estudio, como la óptica no lineal.

Diversificación de las inversiones

La bonanza se mantuvo durante un cuarto de siglo. En 1969, un grupo de consultores militares presentaron un extenso informe denominado «Project Hindsight». En él se argumentaba que las agencias de defensa federal recibían un pobre retorno de su inversión en la investigación no orientada. El senador demócrata por Montana, Michael Mansfield, introdujo a última hora una enmienda a la Ley de Autorización Militar de 1970. La enmienda estipulaba que no deberían destinarse fondos del Departamento de Defensa «a proyectos de investigación o estudios» que no tuvieran «una relación directa y evidente con una función militar específica».

En los campus universitarios de todo el país se exacerbó el debate sobre el apoyo del Gobierno a la ciencia. Durante la guerra de Vietnam, científicos y estudiantes cuestionaron el papel del gasto militar en la educación superior. En la Universidad de Columbia (Nueva York) y la de Wisconsin–Madison, los radicales colocaron explosivos en laboratorios que recibían financiación militar. En otros campus, la policía dispersó a los manifestantes con porras y gases lacrimógenos.

En los años setenta y ochenta, los científicos se aliaron con industrias y fundaciones privadas. Los bruscos recortes en el gasto federal en defensa y educación, tanto en Estados Unidos como en otros países, aceleraron estos cambios. La biotecnología y la nanotecnología emergieron en esas décadas al amparo de sistemas de apoyo que no dependían de la financiación estatal que había amparado la física nuclear tras la Segunda Guerra Mundial.

Los actuales sistemas híbridos de apoyo a la investigación dependen aún en buena medida de la aportación estatal. Sin embargo, la investigación apenas se sustenta ya en el modelo de saturación que parecía tan natural al iniciarse la era nuclear. Según datos de la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos del Banco Mundial, no llegan a 20 los países que invierten más del 2 por ciento de su Producto Interior Bruto en investigación y desarrollo. En muchos de ellos, el apoyo gubernamental se ha desplazado de los proyectos a gran escala y largo plazo a los proyectos con aplicaciones prácticas a corto plazo.

En el siglo xix se forjaron en el Reino Unido, la Europa continental y parte de Asia muchos de los elementos que caracterizan la ciencia contemporánea. Pero conviene tener presente a Galileo si queremos comprender el alcance de las relaciones monetarias que establecen los científicos. En su búsqueda de fondos, visitan los centros de donantes privados como los Institutos Kavli o la Fundación Simons, que desempeñan el papel del Senado de Venecia y ocupan espacios no menos radiantes que el Palacio de los Médici. IyC

Artículo original publicado en *Nature* vol. 573, págs. 487-490, 2019. Traducido con el permiso de Nature Research Group © 2019

Con la colaboración de nature

PARA SABER MÁS

When physics became king. Iwan Rhys Morus. University of Chicago Press, 2005.
Climate in motion: Science, empire and the problem of scale. Deborah R. Coen. University of Chicago Press, 2018.
American hegemony and the postwar reconstruction of science in Europe. John Krige. MIT Press, 2006.
Science-Mart: Privatizing American science. Philip Mirowski. Harvard University Press, 2011.

EN NUESTRO ARCHIVO

¡Calla y calcula! David Kaiser en *IyC*, abril de 2014.
La investigación soviética durante la Guerra Fría. Alexei B. Kojevnikov en *IyC*, abril de 2014.
Los inicios del radar en España. Francisco Sáez de Adana en *IyC*, diciembre de 2019.
La domesticación del tiempo. Aitor Anduaga Egaña en *IyC*, febrero de 2020.

por Hetan Shah

Hetan Shah es el nuevo director ejecutivo de la Academia Británica, en Londres.



Los problemas globales necesitan de las ciencias sociales

Sin los saberes humanísticos, las ciencias duras y de datos no bastarán para hacer frente a los retos del próximo decenio

A principios de año, Dominic Cummings, asesor del primer ministro británico, publicó en su blog un anuncio insólito en el que invitaba a colaborar, en el seno del Gobierno, a científicos de datos, matemáticos y físicos. Como director saliente de la Real Sociedad de Estadística, con sede en Londres, y nuevo director ejecutivo de la Academia Británica, comparto la razón de la convocatoria: sin duda, los datos tienen un poder enorme para cimentar las políticas públicas.

Pero me preocupa que el llamamiento priorizase las ciencias y las tecnologías por encima de las humanidades y las ciencias sociales. Los Gobiernos también deben aprovechar la experiencia de los profesionales de estas disciplinas; de lo contrario, serán incapaces de afrontar los retos del próximo decenio.

Por ejemplo, la salud mundial no mejorará con una perspectiva puramente médica. Las epidemias son fenómenos sociales, además de biológicos (pensemos en el nuevo coronavirus). Los antropólogos tuvieron un papel destacado en la contención del ébola en el África occidental, con propuestas para sustituir los rituales de inhumación insalubres por prácticas más higiénicas, en lugar de suprimirlos por completo.

Los tratamientos psiquiátricos no progresan lo suficiente. Los avances dependen, en parte, de que se entienda mejor cómo influye el contexto social en la eficacia terapéutica. Lo mismo puede argumentarse en el caso de la resistencia a los antimicrobianos y el abuso de los antibióticos.

Los problemas ambientales, por su parte, no son meramente técnicos y no pueden solventarse a golpe de inventos. Para atajar el cambio climático, necesitaremos las aportaciones de la psicología y la sociología. Las innovaciones científicas son necesarias, pero su eficacia exige comprender cómo nos adaptamos a las tecnologías y cómo modificamos nuestros hábitos. Tampoco la pobreza y las desigualdades económicas podrán reducirse solo con ciencia y matemáticas.

Las decisiones políticas que atañen a la identidad nacional y geográfica también necesitan del aporte académico. ¿Cómo podemos convivir en una sociedad multirracial y multiconfesional? ¿Cómo se entienden y se viven las migraciones? Habremos de contar con historiadores, sociopsicólogos y politólogos que arrojen luz sobre estos asuntos. Podría poner más ejemplos: la lucha contra las noticias falsas o la elaboración de marcos éticos para la inteligencia artificial. No son cuestiones que puedan afrontarse solamente con una mejora de las ciencias.



GETTY IMAGES/BRIANAJACKSON/ISTOCK

Fijémonos en la contestación de algunas tecnologías concebidas para mejorar nuestra vida o incluso para salvarla. La desconfianza en torno a la vacunación es un fenómeno más social que técnico, además del principal motivo de resurgimiento del sarampión. Las soluciones no dependen de los adelantos sanitarios, sino de antropólogos que intenten comprender las decisiones de las personas a la hora de vacunarse y vacunar a sus hijos.

En varios casos, hay que tener en cuenta los factores sociales (normas culturales, nivel educativo, redes familiares y sociales) para que las directrices públicas surtan efecto. La fe ciega en los datos, sin entender lo que estos omiten ni cómo agravan los sesgos, puede comportar el fracaso de una medida.

Buen ejemplo de la incorporación de las ciencias sociales en la política es el Equipo de Análisis del Comportamiento (Behavioural Insights Team) del Gobierno británico, que ha llevado a cabo más de 750 proyectos en todo el mundo, en concreto ensayos aleatorizados comparativos de intervenciones públicas. El trabajo sobre el tratamiento de la tuberculosis, realizado en Moldavia, elevó el cumplimiento terapéutico del 44 al 84 por ciento.

Podría hacerse más por conectar a los responsables públicos con las ciencias sociales y las humanidades. El Laboratorio de Gobierno en Chile, el programa Bridging the Gap de Washington y el Centro de Ciencia y Política Pública de Cambridge utilizan diversos mecanismos (talleres, planes de financiación y becas) para integrar la voz de los expertos en la toma de decisiones políticas.

En una democracia, es preciso equilibrar el asesoramiento de los expertos con consideraciones como la opinión pública, los costes económicos y las exigencias políticas. No obstante, sin las humanidades y las ciencias sociales, poco podrán hacer las ciencias duras y la tecnología para resolver los complejos desafíos que plantea la sociedad. Un Gobierno sabio debe encontrar la forma de incorporar esas disciplinas a su actividad.

Artículo original publicado en *Nature*, vol. 577, pág. 295, 2020. Traducido y adaptado con el permiso de Nature Research Group © 2020

Con la colaboración de nature



ASTROQUÍMICA

La primera molécula del universo

Los científicos han identificado en el espacio moléculas misteriosas y el compuesto con el que se piensa que comenzó la química del cosmos

Ryan C. Fortenberry

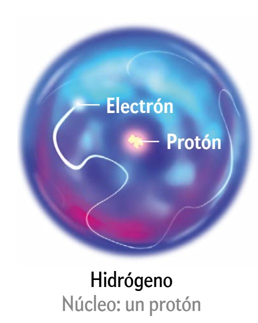
Ilustración de Mondolithic Studios

Ryan C. Fortenberry es profesor de química física en la Universidad de Misisipi y excientífico de la NASA. Utiliza modelos computacionales para predecir el modo en que las moléculas absorben la luz, lo que permite que puedan ser detectadas en el espacio.

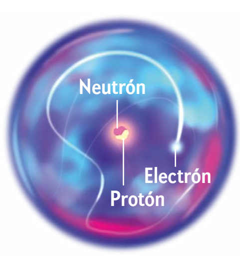


LOS PRIMEROS «ÁTOMOS» DEL UNIVERSO EN REALIDAD NO ERAN ÁTOMOS, sino núcleos que aún no habían encontrado electrones. El núcleo más simple, el del hidrógeno, consiste en un único protón. Tras la gran explosión que dio origen al universo, había una cantidad desmesurada de energía y todo se estrellaba contra todo. Los protones y los neutrones chocaban con frecuencia y algunos formaron núcleos de mayor tamaño, como el del deuterio (que consta de un protón y un neutrón) o el del helio, compuesto por dos protones y dos neutrones. También se produjeron otras combinaciones, pero dado que la identidad de un átomo viene determinada por su número de protones, tales conglomerados no eran sino distintas versiones de hidrógeno y helio, con algunas trazas de litio.

De los tres, el helio fue el que antes comenzó a formar verdaderos átomos. Un átomo es más que un núcleo: también posee electrones. Los núcleos de helio fueron los primeros en completar su cupo de electrones de forma generalizada. ¿Por qué no los de hidrógeno o los de litio? El helio es el primer gas noble de la tabla periódica, es decir, el primer átomo con suficientes electrones para ocupar completamente los espacios disponibles en su capa electrónica. Por lo tanto, si pensamos en los electrones como la «moneda» de la química, el helio es el elemento más codicioso de la tabla periódica. Se requiere más energía para sustraerle un electrón al helio que a cualquier otro elemento. Y para arrancarle un segundo electrón, hace falta más del doble de energía que con el primero. En el universo temprano, una vez que los núcleos de helio comenzaron a atrapar electrones, llenaron las arcas de



Hidrógeno
Núcleo: un protón



Deuterio
Núcleo: un protón y un neutrón



Helio
Núcleo: dos protones y dos neutrones

Litio
Núcleo: tres protones y cuatro neutrones

Átomos de distintos elementos, representados mediante modelos de orbitales que revelan sus componentes subatómicos. En las páginas siguientes se muestran diversas moléculas (dos o más átomos enlazados) empleando modelos tradicionales donde las bolas denotan los átomos y las varillas, los electrones que comparten.

EN SÍNTESIS

Los astroquímicos estudian las moléculas que se encuentran en el espacio, donde las temperaturas y presiones son muy diferentes a las de la Tierra. En consecuencia, muchos de esos compuestos nos resultan poco familiares o incluso desconocidos.

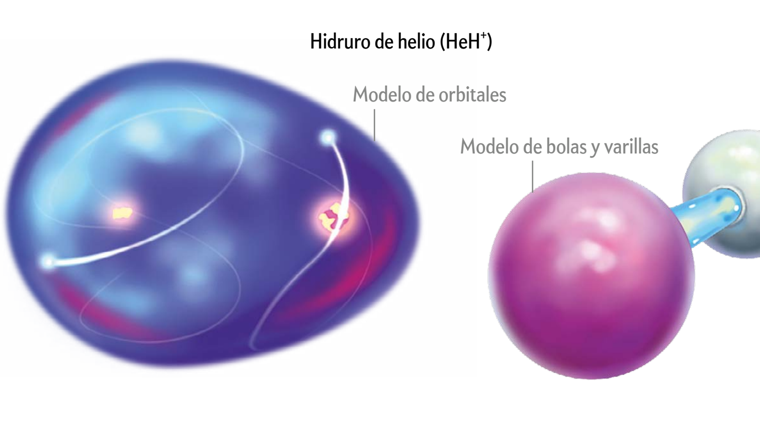
Los últimos descubrimientos están modificando nuestra visión de la química espacial. Los científicos por fin han hallado el hidruro de helio, o HeH^+, una molécula predicha desde hace tiempo y que podría ser la primera que se formó en el universo.

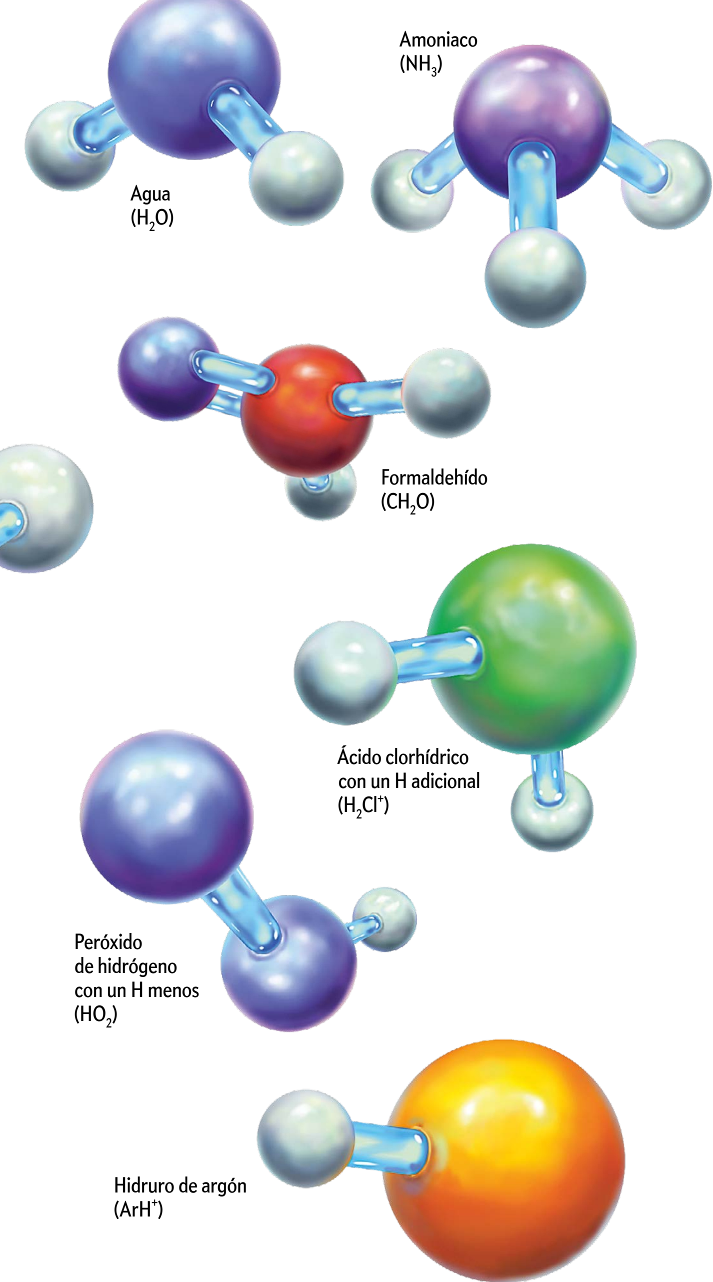
Los investigadores también han comenzado a identificar algunas de las moléculas que producen las bandas interestelares difusas, unas misteriosas huellas químicas observadas desde hace decenios en el espacio interestelar.

ILUSTRACIONES DE ELENA HARTLEY

sus nubes electrónicas mucho antes de que el hidrógeno pudiera empezar a recuperar terreno y de que hubiese siquiera suficientes núcleos de litio en busca de sus tres electrones.

En esa época, el resto de la materia del universo aún consistía en gran medida en protones aislados, que comenzaban a sentir la falta de un electrón. Los protones se ralentizaron y empezaron a buscar compañeros de carga opuesta para volverse eléctricamente neutros. Pero como no les resultaba fácil captar electrones libres, recurrieron al helio, que ya poseía algunos. Pese a que el helio es reacio a compartir, no dejaba de encontrarse con insistentes núcleos de hidrógeno y finalmente la presión de las colisiones hizo que unos pocos átomos de helio compartieran sus electrones con los protones. Así se formaron los primeros enlaces químicos. El nuevo compuesto de helio e hidrógeno se denomina hidruro de helio (HeH^+) y fue la primera molécula (con una abundancia sostenida) del universo.





Resulta sorprendente que el helio fuera el primer elemento en formar enlaces, puesto que hoy nos parecería el que menos probabilidades tiene de unirse a otros: se trata de un gas noble satisfecho, con la cantidad justa de electrones. Sin embargo, en el universo primitivo, el helio era la única opción: el único banco con electrones que prestar.

Esta hipótesis tiene una base teórica sólida desde hace décadas, pero faltaba corroborarla con observaciones. El HeH^+ no puede formarse en la Tierra, salvo en el laboratorio, y durante mucho tiempo no se detectó en el espacio. Sin embargo, el año pasado los astrónomos anunciaron que habían observado la molécula en la pira funeraria de una estrella moribunda. Cuarenta años de búsqueda habían dado sus frutos, añadiendo una pieza nueva y fundamental a nuestra imagen del universo temprano.

El HeH^+ ha pasado a engrosar las filas de las moléculas extraterrestres. Los científicos ya han detectado más de 200 especies moleculares en el espacio. El estudio de la química más allá de nuestro planeta, o astroquímica, pretende dilucidar qué moléculas existen en el espacio, cómo se forman y las implicaciones de su evolución para la astrofísica observacional y teórica. Muchas de las astromoléculas que conocemos, como el agua, el amoníaco y el formaldehído, son comunes aquí en la Tierra. Pero otras nos resultan extrañas, como el ácido clorhídrico con un protón adicional o el peróxido de hidrógeno sin uno de sus átomos de hidrógeno. También se han observado moléculas cargadas, sistemas con electrones desapareados y configuraciones extrañas de átomos en moléculas por lo demás corrientes. Y hemos visto incluso compuestos en los que participan los llamados gases nobles inertes, como el ArH^+ (una combinación de argón e hidrógeno) o el recientemente registrado HeH^+.

Muchas disciplinas relacionadas con la química se centran en hacer del mundo un lugar más seguro, más eficiente o más agradable para el ser humano. La astroquímica, sin embargo, examina las propiedades más básicas de las moléculas. Ayuda a definir qué es realmente el enlace químico, cuánto tiempo pueden permanecer intactas las moléculas y por qué ciertas especies químicas son más comunes que otras. Estudiar la química en entornos tan ajenos a la Tierra —con temperaturas, presiones e ingredientes disponibles muy distintos a los que estamos acostumbrados—, nos permite descubrir moléculas que desafían nuestras ideas sobre cómo interaccionan los átomos y nos brindan una comprensión más profunda de la química. En última instancia, esperamos comprender el modo en que los procesos químicos produjeron los ingredientes que acabarían conformando los planetas de nuestro sistema solar y dando lugar a la vida.

¿DÓNDE ESTABA EL HIDRURO DE HELIO?

En 1925, en un laboratorio de la Universidad de California en Berkeley, Thorfin R. Hogness (quien más tarde trabajaría en el Proyecto Manhattan) y Edward G. Lunn descubrieron que al mezclar helio e hidrógeno gaseoso en una cámara de vacío y en presencia de un arco eléctrico podían generarse distintos iones con diversas masas. La relación entre la masa y la carga de una molécula se puede calcular mediante la llamada espectrometría de masas. La aplicación incipiente de esta técnica, hoy de uso común, demostró que aquella mezcla producía partículas con una relación masa/carga de 5. La única posibilidad era el HeH^+, pero conservar esta molécula el tiempo suficiente para estudiarla entrañaba una dificultad extraordinaria, incluso en las condiciones controladas del laboratorio de Hogness y Lunn.

En el universo primitivo, el HeH^+ habría resultado aún más inestable, ya que tiende a perder su protón al más mínimo contacto con otro átomo. En esta relación, el helio aporta dos electrones y el hidrógeno ninguno. Ese enlace desigual (denominado enlace dativo) es más débil que los enlaces covalentes tradicionales, en los que ambos átomos contribuyen de manera más equitativa.

En 1978, John H. Black, por entonces en la Universidad de Minnesota, postuló que aún podía haber HeH^+ en el espacio. En concreto, propuso buscarlo en las nebulosas planetarias, nubes de materia hinchadas y muy energéticas que se generan durante los estertores de una estrella. Tales nubes suelen presentar una capa delgada de átomos de helio ionizados en presencia de átomos de hidrógeno neutros. La fuerte necesidad de captar electrones del helio podría llevarlo a tomar prestado uno del hidrógeno, formando así un enlace.

Así que desde finales de la década de los setenta, los astrónomos y sus colaboradores químicos han buscado el HeH^+ en infinidad de lugares, desde los confines del universo hasta las estrellas supermasivas. Pero durante decenios sus esfuerzos resultaron inútiles, y eso les llevó a dudar sobre el papel que habría desempeñado el HeH^+ en el arranque de la química. ¿Realmente se enlazó el helio con el H^+? Todo hacía sospechar que sí: por aquel entonces no había nada más a lo que unirse. Pero entonces ¿dónde estaba el HeH^+?

HUELLAS MOLECULARES

Mientras los astroquímicos buscaban en vano el HeH^+, otros investigadores hallaron un gran número de moléculas inesperadas. Algunas ni siquiera supieron identificarlas.

Todo comenzó en 1919. Mary Lea Heger usó el Observatorio Lick, en California, para estudiar el comportamiento de una pareja de estrellas binarias (un sistema gemelo similar a los soles de Tatooine, en *La guerra de las galaxias*) y descubrió algo sorprendente.

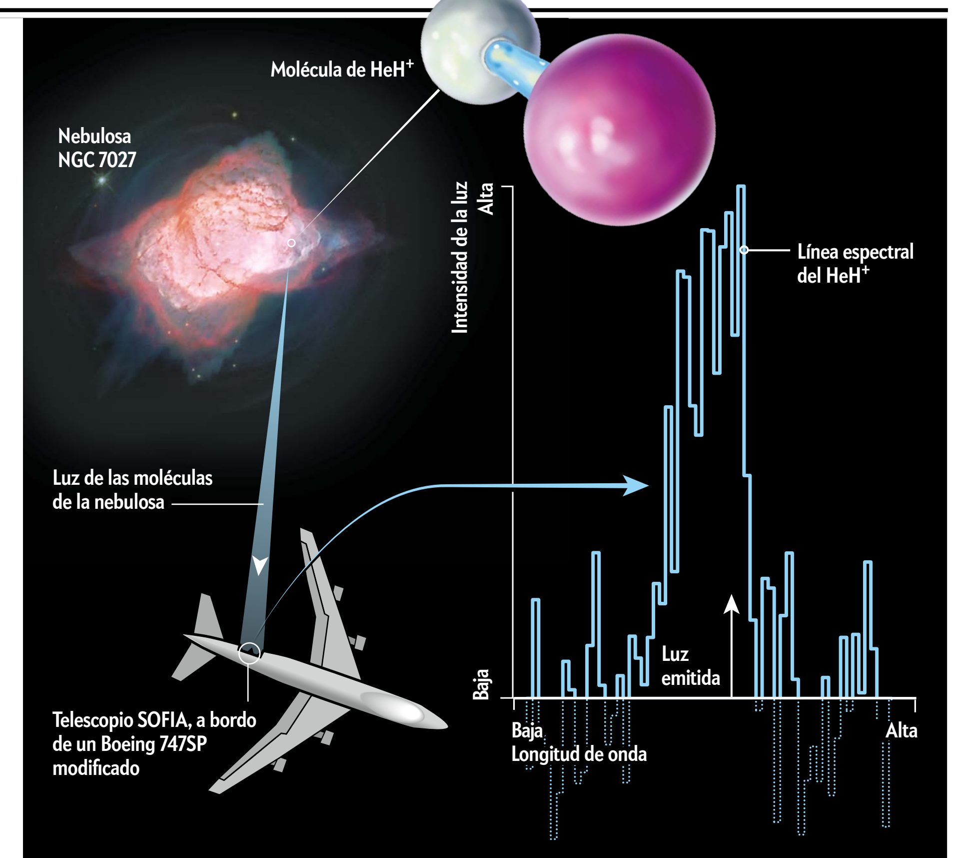
Cada molécula presenta su propia disposición de átomos y electrones y, por tanto, absorbe la luz de un modo particular. Esas «características espectrales» constituyen las huellas dactilares de la molécula, y los astrónomos las observan separando la luz detectada en sus longitudes de onda constituyentes mediante una técnica denominada espectroscopía. A medida que las estrellas binarias de Heger orbitaban alrededor de su centro de gravedad común, la longitud de onda de las características espectrales de sus atmósferas variaba de acuerdo con el efecto Doppler.

Pero Heger también encontró algunas huellas espectrales cuya longitud de onda permanecía invariable mientras las es-

OBSERVACIONES

Señales espectrales

Para identificar moléculas en el espacio, los astrónomos observan su espectro, es decir, las longitudes de onda características que absorben y emiten. Cada molécula posee una firma espectral única, basada en sus propiedades químicas. Los científicos vieron por primera vez la firma del hidruro de helio (HeH^+) cuando crearon el compuesto en el laboratorio y postularon que se habría formado en el universo primitivo. La larga búsqueda de este compuesto en el espacio concluyó en 2016, cuando los investigadores detectaron esa firma en la luz de la nebulosa NGC 7027 gracias al Observatorio Estratosférico de Astronomía Infrarroja (SOFIA), un telescopio de infrarrojos instalado a bordo de un avión comercial reconvertido.

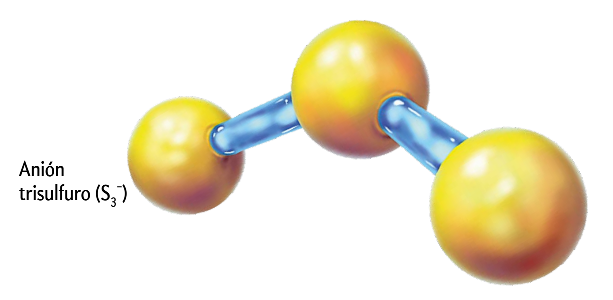


HUBBLE, NASA, ESA, PROCESADO POR JUDY SCHMIDT (*nebulosa*); FUENTE: «ASTROPHYSICAL DETECTION OF THE HELIUM HYDRIDE ION HEH+». POR ROLF GÜSTEN ET AL. EN *NATURE*, VOL. 568, PÁGS. 357–359, ABRIL DE 2019 (*espectro*); ELENA HARLTEY (*moléculas*) Y AMANDA MONTAÑEZ (*esquema*)

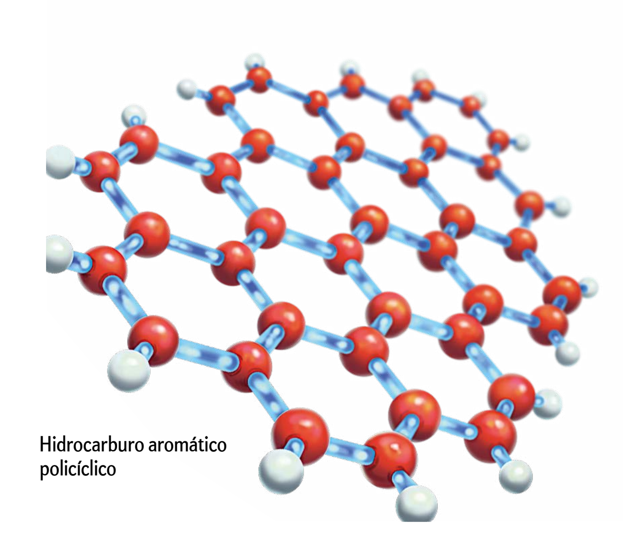
trellas se movían. Al estudiar otro sistema estelar binario, observó el mismo patrón, y otros trabajos posteriores demostraron que esos rasgos inmutables también aparecían cuando los telescopios apuntaban a estrellas individuales. Las señales debían proceder de moléculas que no se hallaban alrededor de las estrellas, sino en las vastas regiones frías intermedias. Lo más asombroso era que se observaban básicamente las mismas huellas en todas las estrellas estudiadas e incluso en otras galaxias. Esas «bandas interestelares difusas» (BID) estaban en todas partes. Los científicos escudriñaron los datos sobre las características espectrales de las moléculas terrestres, las recién sintetizadas en el laboratorio y las observadas en el espacio a través de radiotelescopios. Ninguna coincidía con las BID: se trataba de algo nuevo.

William Klemperer, difunto profesor de la Universidad Harvard y uno de los grandes pioneros de la astroquímica, propuso que las BID podían corresponder al anión trisulfuro, S_3^-. Cuando se demostró que no era así, se sintió tan abatido que escribió: «No hay mejor manera de tirar por la borda la reputación científica que especular sobre el responsable de las bandas [interestelares] difusas». Durante décadas se formularon diversas hipótesis sobre el origen de las BID —que pasó a ser conocido como el problema más antiguo de la espectroscopía— pero ninguna cuajó.

Una de las teorías más interesantes apuntaba a los hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP) como posible causa de las BID. Los HAP —hexágonos de átomos de carbono dispuestos en láminas— son el principal componente del hollín, el asfalto y el grafito. Aunque no suelen reaccionar con otras moléculas, tienden a adherirse a ellas. Para los astroquímicos, el problema de los HAP es que sus múltiples variedades se asemejan tanto que sus huellas espectroscópicas, o espectros, se solapan. Es como tratar de distinguir las pinceladas de *La noche estrellada* de Van Gogh en lugar de apreciar el cuadro en su conjunto: sus múltiples partes se confunden en el todo. Pero las BID también parecían comportarse de modo similar. ¿Podían los HAP explicar estas bandas?



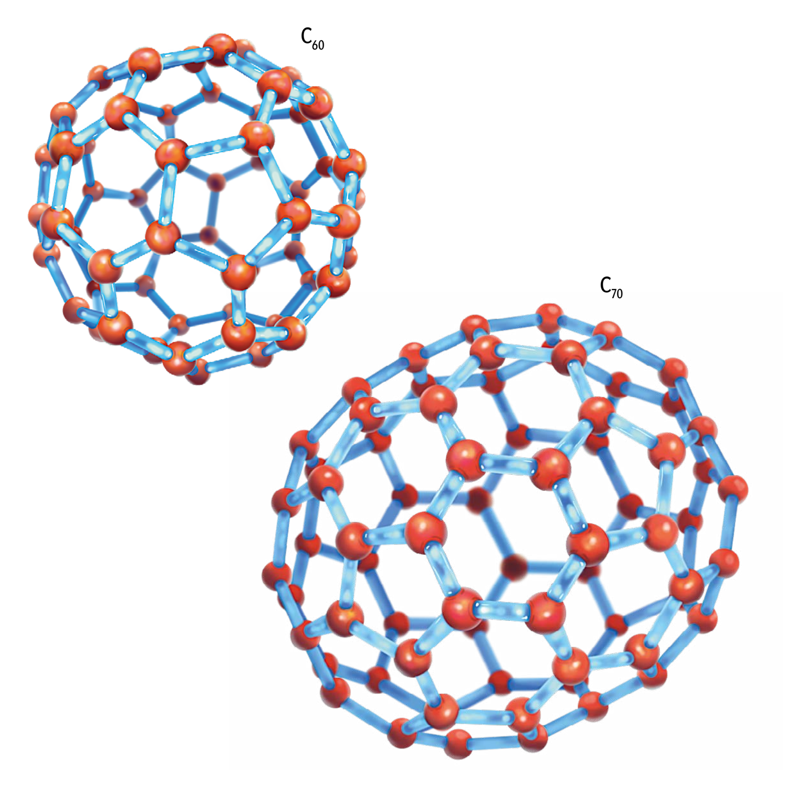
Aunque los astroquímicos llevan considerando estas ideas desde la década de los setenta, hubo un experimento que cambió para siempre nuestra concepción del carbono. En los años ochenta, Harry Kroto, fallecido en 2016, trabajaba en la Universidad de Sussex, Inglaterra, y formaba parte de un equipo que buscaba nuevas moléculas en el espacio. Kroto oyó hablar de un experimento realizado por dos químicos de la Universidad Rice, Robert F. Curl y Richard E. Smalley, que habían hallado una plétora de nuevos agregados moleculares de aluminio a partir de la ablación de una superficie de este metal. Cuando sustituyeron el aluminio por grafito, apareció una molécula muy extraña: C_{60}, formada por 60 átomos de carbono organizados en forma de balón de fútbol. En 1996, Kroto, Curl y Smalley recibieron el premio Nobel de química por su papel en el descubrimiento



de la molécula, llamada buckminsterfullereno, o simplemente fullereno (y también conocida como «buckybola») [*véase* «Fullerenos», por Robert Curl y Richard Smalley; Investigación y Ciencia, diciembre de 1991].

Kroto estaba convencido de que había buckybolas en el espacio y de que podían ser la fuente de algunas BID. Pero pocos le creyeron, y Kroto y sus colegas pasaron página. Sin embargo, en 2010, un cuarto de siglo después de su descubrimiento en el laboratorio, el C_{60} y su pariente cercano C_{70} se observaron en longitudes de onda infrarrojas en la nebulosa planetaria Tc1, situada en la constelación del Cisne. No obstante, aún no estaba claro si esas moléculas guardaban relación con las BID del espectro visible. Aunque los estudios teóricos así lo sugerían, no había datos experimentales que lo confirmasen.

Finalmente, en 2015, los científicos lograron atrapar en el laboratorio la forma catiónica del fullereno, C_{60}^+, y midieron su espectro en el infrarrojo cercano. Dos de las líneas espectrales de la molécula se correspondían con longitudes de onda conocidas



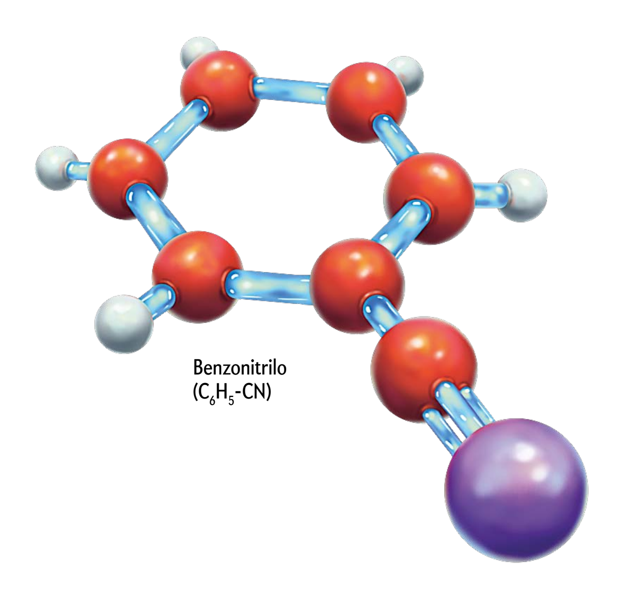
de las BID. Más adelante, los investigadores demostraron que esas huellas concordaban con cuatro o cinco bandas difusas. Y en 2019, un equipo internacional dirigido por Martin A. Cordiner, del Centro de Vuelos Espaciales Goddard de la NASA, empleó el telescopio espacial Hubble para examinar las longitudes de onda de las BID en la dirección de 11 estrellas, en su mayoría rojas (más viejas y grandes), y descubrió que coincidían con los datos experimentales del C_{60}^+. Eso confirmaba por fin que las características espectrales de la molécula estaban detrás de algunas BID.

El hallazgo pone de manifiesto que hay al menos un tipo de molécula que deja sus huellas por todo el espacio interestelar. Se cree que las buckybolas evolucionan a partir de los HAP, así que estos también deberían estar presentes en el espacio. Sin embargo, hasta 2018 los investigadores no observaron la firma de una molécula de la familia de los HAP. El compuesto que identificaron, el benzonitrilo (C_6H_5-CN), es un hidrocarburo aromático poco frecuente y más fácil de detectar que sus parientes. Más recientemente, los científicos han vislumbrado una molécula de doble anillo, el cianonaftaleno, lo que demuestra que también existen HAP más grandes en el espacio.

DESCUBRIMIENTO

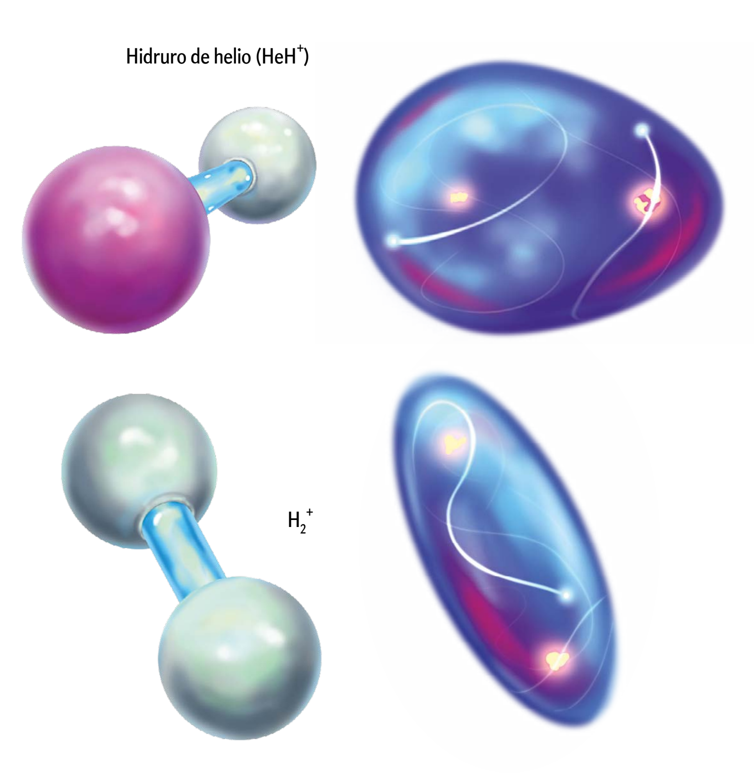
A pesar de esos logros, el HeH^+ siguió mostrándose esquivo durante mucho tiempo.

Las primeras moléculas se habrían disipado bastante rápido tras las etapas iniciales del universo. A medida que este maduraba, se expandía y se enfriaba, los núcleos de hidrógeno restantes comenzaron a atrapar electrones, convirtiéndose en átomos de hidrógeno neutros que seguramente sintieron la carga positiva de las moléculas de HeH^+. Cuando los átomos chocaban con las moléculas, los enlaces dativos He-H, relativamente débiles, se rompían y ambos hidrógenos se unían mediante enlaces covalentes (mucho más fuertes) para generar H_2^+. Desde entonces, los átomos de helio permanecieron bastante imperturbables.



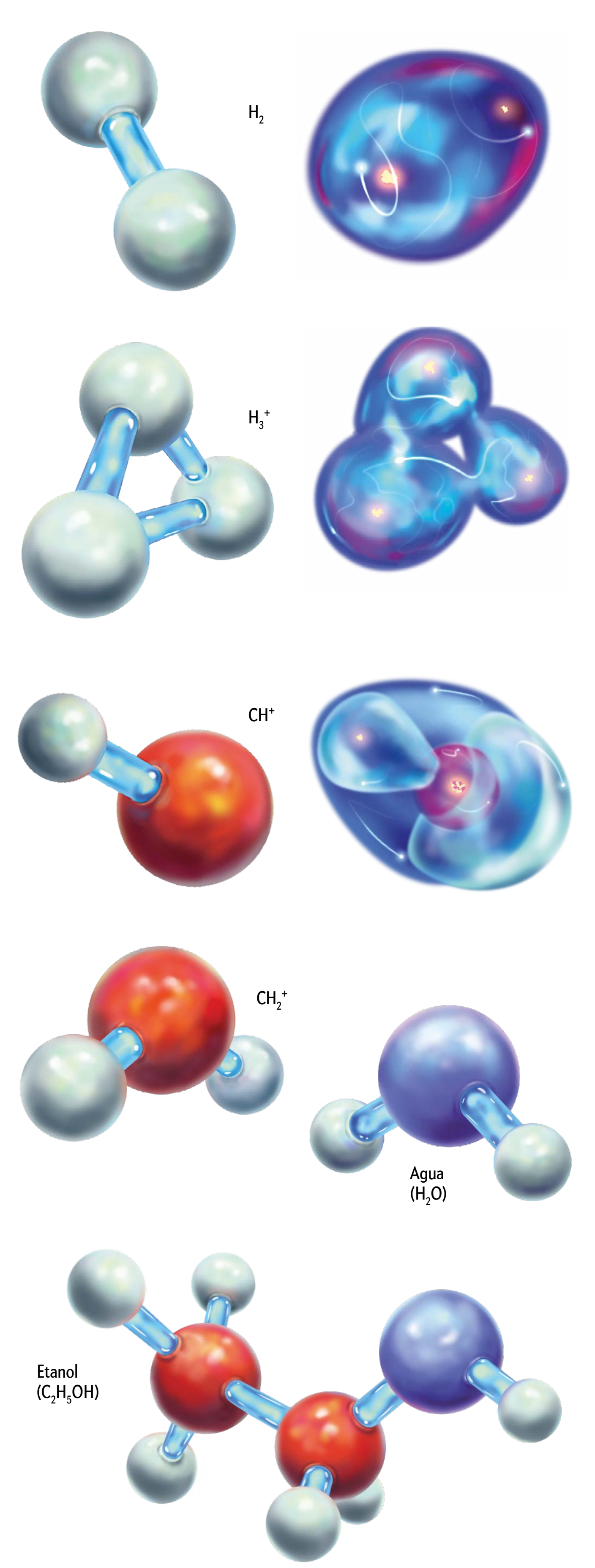
Así pues, cabría pensar que la fugaz existencia del HeH^+ fue intrascendente, pero nada más lejos de la realidad. Los modelos de las reacciones químicas que podrían haberse producido en aquel período indican que, sin el HeH^+, el H_2^+ y posteriormente el H_2 neutro habrían tardado mucho más en formarse. Sin embargo, una vez generado el H_2, se desplegó todo el árbol de la química. A continuación apareció el H_3^+, que engendró el CH^+, que a su vez dio lugar al CH_2^+ y a todo un aluvión de moléculas. Con el tiempo, esta cadena acabó produciendo el agua, el etanol y otras especies de mayor tamaño. Todos estos procesos derivan del enlace desequilibrado del HeH^+; sin esa relación inicial, el universo sería un lugar diferente.

Y aun así, en 2013 los astroquímicos estaban comenzando a frustrarse porque el HeH^+ no aparecía por ninguna parte. Pero ese año se produjo un hallazgo esperanzador: la detección de ArH^+, una molécula relacionada formada por otro gas noble, en el remanente de supernova de la nebulosa del Cangrejo. Los científicos centraron la búsqueda del HeH^+ en entornos similares, con una energía muy elevada. El principal problema era que las huellas del HeH^+ se situaban en la misma región del espectro que las de la primera molécula observada en el espacio, el radical CH, y ningún telescopio era capaz de separarlas.



Entonces llegó el Observatorio Estratosférico de Astronomía Infrarroja (SOFIA), un Boeing 747 reconvertido, con un lateral agujereado que permite las observaciones de un telescopio infrarrojo. En mayo de 2016, un equipo internacional usó SOFIA (que es un proyecto conjunto de la NASA y el Centro Aeroespacial Alemán) para realizar observaciones durante tres noches. El telescopio de SOFIA cuenta con la resolución necesaria para distinguir la firma del HeH^+, una línea de su espectro rotacional con una frecuencia de 2010,184 gigahercios. Y allí, entre los datos del infrarrojo lejano procedentes de los restos de otra explosión estelar (la nebulosa planetaria NGC 7027, también en la constelación del Cisne), hallaron la huella que se había escabullido durante tanto tiempo. Aquella región infernal, con sus altas temperaturas y energías, no era muy distinta del universo primitivo. El 17 de abril de 2019, un equipo dirigido por Rolf Güsten, del Instituto Max Planck de Radioastronomía de Bonn, publicó un artículo en *Nature* para anunciar el descubrimiento del HeH^+.

Evidentemente, no se trataba de HeH^+ primordial. Pensamos que las moléculas observadas por Güsten y sus colaboradores



se formaron en tiempos mucho más recientes. Sin embargo, el hallazgo amplía nuestro conocimiento de este compuesto. Ahora los científicos pueden diseñar mejores modelos para describir el universo cuando no había más molécula que el HeH^+. El descubrimiento quizá también nos dé pistas sobre otros lugares del espacio donde podría ocultarse el hidruro de helio, dirigiendo nuestros estudios hacia otras nebulosas planetarias o incluso hacia regiones distantes que correspondan a épocas mucho más tempranas y nos retrotraigan a los albores del universo.

En última instancia, esperamos comprender el modo en que los procesos químicos produjeron los ingredientes que acabarían conformando los planetas de nuestro sistema solar y dando lugar a la vida

PREGUNTAS MÁS DIFÍCILES

La astroquímica vive un momento emocionante. Se han respondido tres grandes preguntas de manera consecutiva y concluyente: los científicos han observado la primera molécula que se formó en el universo, han comenzado a identificar las fuentes de las misteriosas BID y por fin están vislumbrando los HAP en la oscuridad del espacio.

Además, las simulaciones de las condiciones interestelares en el laboratorio nos muestran cómo podrían haberse formado los aminoácidos y las bases nitrogenadas. Los telescopios espaciales como SOFIA, el Hubble y el próximo observatorio James Webb permitirán determinar el espectro de los objetos estelares a un nivel sin precedentes, lo que podría revelar nuevas huellas moleculares menos comunes.

Ahora que empezamos a hallar respuestas a estos problemas, comienzan a emerger nuevos dilemas. Con el tiempo, los astroquímicos esperan abordar otras preguntas más difíciles, como de dónde proceden el resto de BID, cuáles son los orígenes moleculares de la vida o qué mezcla química se requiere para que se formen planetas rocosos en lugar de gigantes gaseosos. La necesidad de compartir electrones fue lo que creó la materia observable del cosmos. Cuando entendamos mejor tales procesos químicos, obtendremos un conocimiento más detallado de la astrofísica y la historia de nuestro universo. IyC

PARA SABER MÁS

The cosmic-chemical bond: Chemistry from the Big Bang to planet formation. David A. Williams y Thomas W. Hartquist. Royal Society of Chemistry, 2013.
Astrophysical detection of the helium hydride ion HeH^+. Rolf Güsten et al. en *Nature*, vol. 568, págs. 357-359, abril de 2019.
Página web de recursos sobre astroquímica: **http://www.astrochymist.org**

EN NUESTRO ARCHIVO

El origen astroquímico de los sistemas planetarios y la vida. Rafael Bachiller en *IyC*, abril de 2015.



COGNICIÓN ANIMAL

La sorprendente inteligencia de las aves

Algunas aves usan útiles y se reconocen ante el espejo. ¿Cómo un cerebro tan diminuto logra tales proezas?

Onur Güntürkün

Fotografías de Tim Flach

Onur Güntürkün es profesor de biopsicología en la Universidad del Ruhr en Bochum. Estudia la cognición y la neurociencia en el ser humano, la paloma y otros animales.





En mi laboratorio de la Universidad del Ruhr en Bochum, procedimos a sacar a Gerti de su jaula. Con la cabeza encapuchada, le colocamos a nuestra urraca (*Pica pica*) una pequeña pegatina amarilla sobre el plumaje negro de la garganta, que por su ubicación no podía ver. A continuación, la introdujimos en una jaula de prueba provista de un espejo grande y la dejamos sola sin la capucha antes de pasar a la sala aledaña, donde la observamos a través de un monitor de TV. Primero miró el espejo y, de inmediato, trató de arrancársela con frenesí rascándose la garganta y restregándose contra el suelo. Conseguido al fin, se contempló ante él para serenarse. En los simios superiores, semejante conducta se considera demostrativa del reconocimiento de sí mismo. Hasta entonces, era inédita en un ave.

Recuerdo que aquel día de 2006 estábamos exultantes, pero tuvimos que hacernos la pregunta obvia: ¿y si andábamos equivocados? ¿Se la habría arrancado simplemente por una sensación extraña en la garganta? Nuestro equipo de Bochum, formado por Helmut Prior, Ariane Schwarz y por mí mismo, volvió a poner a prueba a Gerti en condiciones idénticas, excepto que ahora llevaría una pegatina negra apenas visible sobre el plumaje del mismo color. En otras condiciones comparativas le adosamos una amarilla pero sin poner a su disposición un espejo. En ningún caso intentó arrancárselas. El comportamiento aversivo tuvo lugar solo cuando pudo ver en el espejo la llamativa pegatina sobre el plumaje. Otras urracas se comportaron de modo similar, por lo que llegamos a la conclusión de que esta especie de córvido parecía saber que estaba viendo su reflejo en el espejo.

Aparte de los humanos, son contados los mamíferos de cerebro voluminoso que han mostrado esos indicios de autorreconocimiento: el chimpancé, el orangután, el elefante indio y el delfín mular son ejemplos. Esa capacidad de la urraca para reconocerse ante el espejo es solo uno de los numerosos aspectos de la cognición compleja que de un tiempo a esta parte se han descubierto en los córvidos y en los psitácidos (papagayos). Tales descubrimientos remueven la secular teoría dominante de que semejante aptitud exige poseer una corteza extensa, la capa exterior del prosencéfalo. Puesto que las aves carecen de ella, no deberían destacar en el autorreconocimiento ni en otras pruebas cognitivas. Durante las últimas dos décadas, el estudio sobre la cognición en estos vertebrados ha revelado cómo fisiologías tan distintas como la del cerebro aviar y la del cerebro humano pueden, en el curso de cientos de millones de años, dar lugar a facultades cognitivas asombrosamente parecidas que conforman la base del aprendizaje de alto nivel, la conciencia de uno mismo y la toma de decisiones.

MODALIDADES DE LA EVOLUCIÓN COGNITIVA

Para entender por qué los biólogos creen que las aves carecen de tales aptitudes, hemos de remontarnos a finales del siglo xix, al laboratorio de neuroanatomía de Ludwig Edinger, en la Universidad Goethe de Frankfurt. Edinger, que vivió entre 1855 y 1918, dedicó su labor científica a trazar la evolución del cerebro y de la mente de los vertebrados. Comparaba el proceso evolutivo con una pirámide escalonada en cuya base se situaban los peces con sus caracteres primitivos, que ascendía en complejidad con los anfibios, los reptiles y las aves hasta culminar en los mamíferos. Descubrió que los componentes más básicos del encéfalo siempre habían existido en los vertebrados.

EN SÍNTESIS

Entre otras aves, los córvidos y los psitácidos demuestran poseer una cognición compleja que abarca el razonamiento causal, la flexibilidad mental, la planificación, la inteligencia social y la imaginación.

Tales capacidades han sorprendido a muchos investigadores, que no las esperaban en las aves a causa del reducido tamaño de su encéfalo y de la carencia de corteza cerebral.

Esa pequeñez la compensan con una densidad neuronal mucho mayor. De modo independiente, aves y mamíferos han desarrollado redes neuronales y regiones cerebrales similares que desempeñan funciones cognitivas.

Ahora bien, una gran región de este, el cerebro, parecía haber experimentado grandes cambios evolutivos que posiblemente explicaban la expansión de las capacidades cognitivas. El cerebro consta de dos grandes partes: el palio (del latín *pallium*, «manto») y el subpalio, situado debajo. El palio de los mamíferos está constituido en su mayor parte por la corteza (sede principal de la cognición en dichos animales), si bien engloba otros elementos más pequeños, como la amígdala y el hipocampo. En cambio, el subpalio semeja una masa homogénea de neuronas que almacena y después activa patrones de movimiento aprendidos. La situación en las aves es radicalmente distinta. Si un observador sigue el esquema anatómico definido por Edinger, verá que el palio guarda una estrecha semejanza con el subpalio. El neuroanatomista confundió gran parte de aquel con este y llegó a la conclusión de que las aves poseían un subpalio enorme y un palio diminuto, por lo que sus capacidades cognitivas debían de ser muy limitadas.



UNA URRACA examina su reflejo en la recreación de un experimento de autorreconocimiento.

¡Qué error! Edinger gozaba de prestigio como hombre de ciencia en su época y la teoría parecía explicar de modo convincente la notable inteligencia de los mamíferos. Por eso, perduró durante más de un siglo y caló hondamente en el pensamiento de los neurocientíficos hasta los primeros años del siglo xxi.

Una segunda razón por la que el encéfalo de las aves se tenía por inferior reside en su tamaño. El avestruz posee el mayor de todos, con unos 25 gramos de peso. Compárense con los 400 gramos que ronda el del chimpancé, los 1300 del ser humano y los asombrosos 9000 del cachalote. Al menos en los primates, el tamaño corre en paralelo con las capacidades cognitivas. En suma, a las aves se les atribuía una inteligencia muy limitada por la carencia de un gran palio cortical y por la pequeñez de su seso. ¿Cómo es posible, pues, que Gerti superara la prueba de la pegatina y del espejo y aventajara así a la mayoría de los mamíferos dotados de un cerebro más voluminoso? O las aves no son tan inteligentes, o algo era erróneo en esa idea secular de que la inteligencia requiere una gran corteza.

EL CUERVO DE NUEVA CALEDONIA

Podemos adquirir cierta perspectiva si nos fijamos en el cuervo de Nueva Caledonia (*Corvus moneduloides*), del Pacífico sur, que se alimenta de las larvas que extrae de las grietas y oquedades de la corteza de los árboles. En 1996, Gavin Hunt, entonces en la Universidad Massey de Nueva Zelanda, dio a conocer que esta especie fabrica dos tipos de útiles para capturar a sus presas. El proceso de elaboración es tan refinado que Hunt lo comparó con la fabricación de útiles líticos por los humanos del Paleolítico Medio, hace entre 300.000 y 40.000 años.

Otras especies también parecen hacer uso de útiles, pero cuando son sometidas a escrutinio en condiciones adecuadas, gran parte de ese comportamiento resulta estar basado en secuencias de respuestas programadas de forma innata, no en el razonamiento de un problema. Alex H. Taylor, de la Universidad de Auckland, y Russell Gray, del Instituto Max Planck para la Ciencia de la Historia Humana, en Jena, se embarcaron en estudios para desentrañar la base mental del uso de útiles en el cuervo de Nueva Caledonia. Esos experimentos revelaron que resuelve problemas analizando las relaciones de causalidad subyacentes. Planifica premeditadamente a través de representaciones mentales de objetos que nunca ha visto y saca deducciones sobre las relaciones de causa y efecto de los eventos que observa.

No obstante, tiene ciertos límites en la comprensión de la física de sus acciones. Si bien deduce el peso de los objetos por el modo en que los balancea el viento, en ocasiones no logra entender que el impacto de los objetos pesados sobre la superficie es mayor que el de otros. Demuestra, pues, una notable destreza en muchos aspectos de la cognición física, aunque no en todos.

¿Y qué hay de la cognición social? El cuervo coopera en equipo, pero no entiende que sus compañeros puedan colaborar en una tarea encarnando una suerte de «herramienta social» que ayude a lograr un objetivo con menos dificultad. Observa los objetos que otros pájaros manipulan, pero no repara en detalles críticos del comportamiento ajeno que le permitirían comprender las secuencias de acción adecuadas. En lugar de ello, parece visualizar cómo opera una herramienta y después somete a ingeniería inversa lo que recuerda, más que aprender directamente de los demás. Si bien ha adquirido una cognición física extraordinaria, no ocurre lo mismo con las actividades mentales que entrañan sus interacciones sociales. ¿Es esa una limitación exclusiva de esta especie, o se extiende a otras aves? El examen de un pariente cercano, el cuervo grande (*Corvus corax*), ofrece una respuesta.

ARGUCIAS DE CUERVO

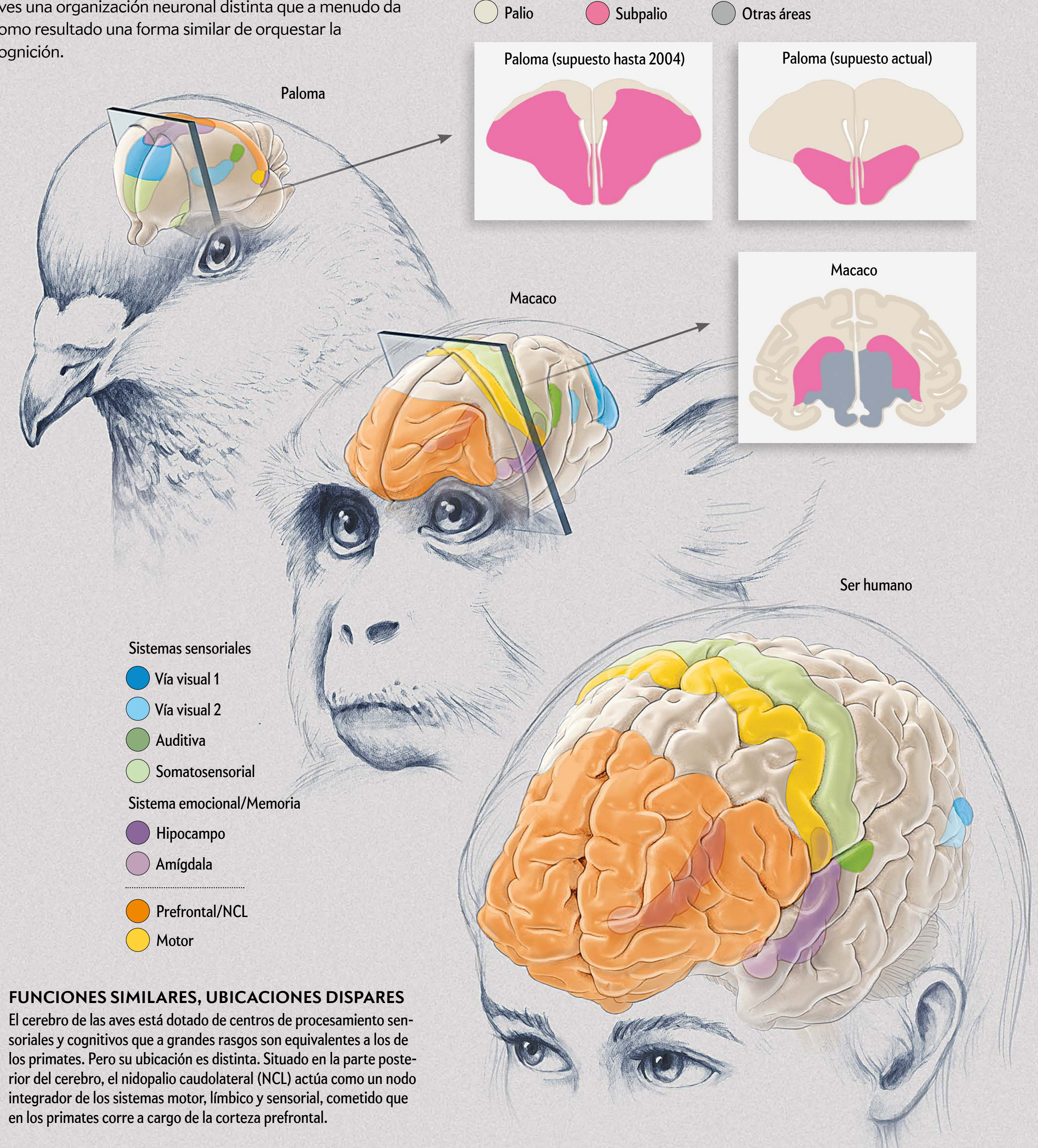
Los jóvenes cuervos grandes que no tienen pareja ni territorio forman bandadas que temporalmente se congregan ante la perspectiva de un festín, como el que supone el cadáver de un gran animal. Cuando los grandes depredadores defienden sus piezas, este cuervo llama a los demás miembros de la bandada para que desplieguen tácticas de distracción que les permitan a todos hacerse con un bocado. Para evitar los hurtos, trama artimañas para que otras aves no puedan observar su despensa. De igual

Inteligencia de pájaro

El diminuto encéfalo de las aves hizo pensar a los neuroanatomistas que no podían ser inteligentes en absoluto. Pero la expresión «cabeza de chorlito» ha perdido su razón de ser. La evolución ha producido en las aves una organización neuronal distinta que a menudo da como resultado una forma similar de orquestar la cognición.

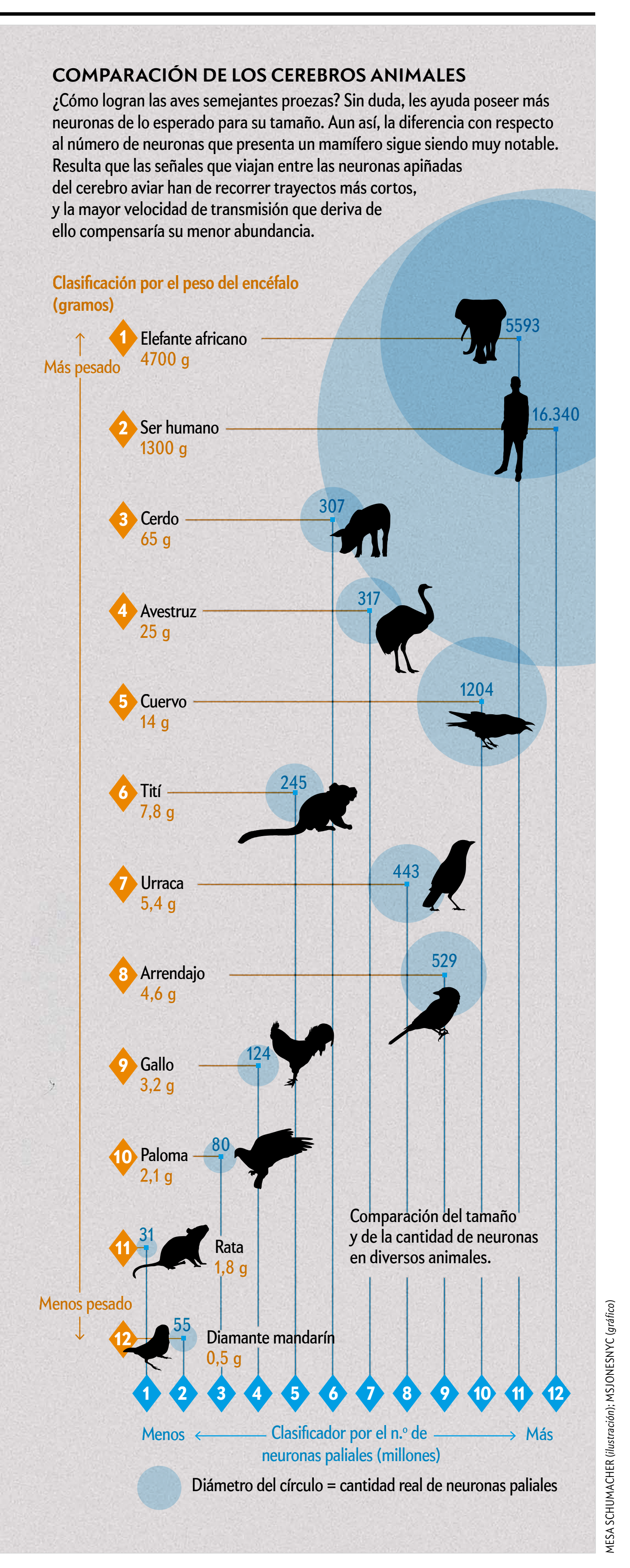
CAMBIO DE CONCEPCIÓN

Hasta 2004 se creía que la región frontal del encéfalo de las aves, el cerebro, abarcaba una pequeña parte del palio, que participa en la cognición compleja. Según la nueva idea, ocupa un espacio equivalente, en tamaño relativo, al palio del encéfalo de un macaco.



FUNCIONES SIMILARES, UBICACIONES DISPARES

El cerebro de las aves está dotado de centros de procesamiento sensoriales y cognitivos que a grandes rasgos son equivalentes a los de los primates. Pero su ubicación es distinta. Situado en la parte posterior del cerebro, el nidopalio caudolateral (NCL) actúa como un nodo integrador de los sistemas motor, límbico y sensorial, cometido que en los primates corre a cargo de la corteza prefrontal.



MESA SCHUMACHER *(ilustración)*; MSJONESNYC *(gráfico)*

manera, observa a otras para arrebatarles al menor descuido cualquier alimento que almacenen. Las parejas de cría también defienden su territorio frente a otros congéneres. Durante esas disputas, tanto las parejas como los individuos no reproductores con redes sociales desarrolladas tienen más posibilidades de salir ganando y conservar su despensa. Thomas Bugnyar, de la Universidad de Viena, Bernd Heinrich de la Universidad de Vermont, y sus colaboradores son pioneros en los estudios que han revelado que el cuervo grande posee esas estrategias sociales tan elaboradas.

Un requisito para todas esas actividades pasa por intuir las redes a las que pertenecen otras aves, así como las intenciones de cualquier individuo con el que se topen en sus andanzas cotidianas. Los cuervos permanecen atentos a las vocalizaciones que indican que puede haber ocurrido un cambio en el escalafón. De igual modo, se sirven de su conocimiento sobre las redes sociales cuando son atacados por un congénere dominante. Cuando sus allegados no andan lejos, los alertan prorrumpiendo en llamadas de socorro reiteradas, pero permanecen más callados cuando la pareja del atacante ronda cerca. Como el rango en una jerarquía de dominancia aumenta tras el emparejamiento, las aves vigilan los lazos que traban los demás e intervienen con contundencia para romper sus emparejamientos. Con ese proceder tal vez impiden que otros creen nuevos lazos y que los competidores asciendan de nivel.

La competencia social también es necesaria en otros ámbitos. El cuervo grande sabe reconocer cuándo está siendo observado y otro pájaro podría estar espiando su despensa. Parece entender lo que otros pueden o no pueden ver e incluso sopesar el grado de conocimiento del otro —un atributo de la denominada «teoría de la mente». Si es necesario, engañan a los mirones inoportunos conduciéndolos a un lugar vacío donde simulan haber hecho acopio de alimento.

Esas habilidades sociales aparecen acompañadas de un alto grado de autocontrol y una sólida comprensión de en qué momento conviene recurrir a la fuerza o dar un paso atrás en el trato con otros animales. Can Kabadayi y Mathias Osvath, ambos en la Universidad de Lund, demostraron que el cuervo grande es capaz de planificar diferentes tipos de eventos futuros. Opta por elegir un útil, como una piedra, antes que una pequeña recompensa inmediata. Gracias a eso, obtiene una mayor ganancia al día siguiente al canjear o emplear la herramienta para conseguir algún beneficio. En definitiva, reúne todos esos aspectos propios de la cognición compleja en un cerebro de escasos 14 gramos.

DE LOROS Y PALOMAS

El cuervo grande y el cuervo de Nueva Caledonia son solo dos ejemplos de córvidos con facultades cognitivas notables. Nicola Clayton, de la Universidad de Cambridge, ha demostrado en dos décadas de investigación que la chara floridiana (*Aphelocoma coerulescens*), otro córvido, sobresale en todos los aspectos de la cognición compleja. Un hito importante es que fue el primer animal en el que se descubrió la existencia de la memoria episódica. Esta permite recordar acontecimientos pretéritos de la vida e imaginar actividades futuras.

Por su parte, los logros de algunas especies de loros son equiparables a los de los primates. Recuerdo a Alex, un extraordinario loro gris. Irene Pepperberg, de la Universidad Harvard, que junto con Clayton fue pionera en los estudios sobre la cognición en psitácidos y córvidos, demostró la habilidad de Alex para clasificar diversos objetos, acciones y cantidades numéricas hasta ocho. Asimismo, verificaron que entendía conceptos de

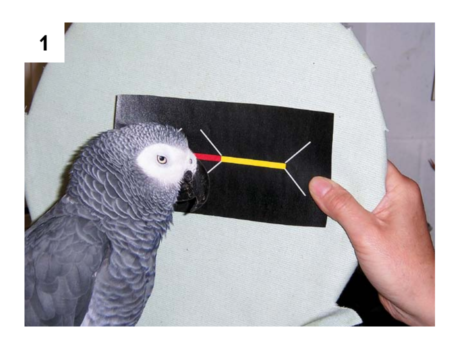
tamaño relativo, que sabía discernir cuándo estaba ausente un objeto y apreciar semejanzas y diferencias en los atributos de este. Incluso podía hacer sumas sencillas aplicando un concepto similar al cero en las tareas numéricas.

Por muy impresionantes que sean estos estudios, los primatólogos han planteado si esas aves solo serían inteligentes en ciertos dominios cognitivos muy limitados, en comparación con los primates. De ser así, los córvidos y los psitácidos deberían fracasar ante una gama amplia de tareas. A fin de indagar en esta cuestión, junto con Bugnyar buscamos estudios sobre diversas facultades cognitivas en primates no humanos e investigaciones similares en cuervos y loros. Tras recopilar todas las publicaciones disponibles en ocho áreas de la cognición compleja, concluimos que la cognición de los córvidos y los psitácidos va a la par con la de los primates no humanos, tanto en magnitud como en amplitud.

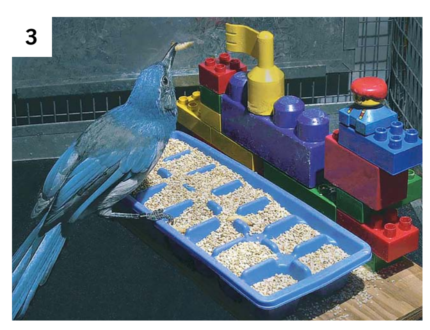
Es sabido que los miembros de estas familias de aves son inteligentes. Pero ¿qué hay de otras, como las palomas (*Columba livia*)? Mientras que el encéfalo de la urraca común, del cuervo grande y del cuervo de Nueva Caledonia pesa, respectivamente, uno 5,5, 8 y 14 gramos, el de una paloma ronda los 2 gramos, equiparable al de una rata. Resulta que hasta ellas son más listas de lo que se suponía. Lorenzo von Fersen y Juan Delius, ambos en Bochum, demostraron que son capaces de memorizar 725 patrones abstractos y usar lógica deductiva transitiva. (Un ejemplo: uno puede deducir que Jennifer es más alta que Sara si sabe que Jennifer es más alta que Sonia y que esta es más alta que Sara.)

En fecha más reciente, junto con Damian Scarf y Mike Colombo, de la Universidad de Otago, y otros colaboradores, hemos demostrado que las palomas aprenden a distinguir entre palabras inglesas de cuatro letras y pseudopalabras, compuestas por la combinación de una vocal con tres consonantes. Dominaron esa tarea y trasladaron ese conocimiento a nuevos conjuntos de palabras y pseudopalabras por medio de estrategias de deletreo similares a las que ponen en práctica los escolares de primaria. En general, en algunas de esas tareas consiguen unos rendimientos cognitivos similares a los de los córvidos y los psitácidos, pero no en todas. Las culminan con éxito, pero precisan mucho más tiempo para aprender la tarea y más adiestramiento para entender una regla abstracta. No todas las aves son tan inteligentes como el cuervo o el loro, pero lo son más de lo que pensábamos.

Si las aves salen airosas de tareas cognitivas tan diversas con un seso pequeño carente de corteza, deben encontrar el modo de compensar esas limitaciones. Desde los años sesenta, Harvey Karten, hoy en la Universidad de California en San Diego, ha venido aplicando métodos innovadores en una serie de estudios que demuestran que la mayoría de lo que Edinger calificó en su día como subpalio aviar debe ser en realidad palio. Ha llegado a demostrar que las vías sensoriales y motoras que conectan el palio con otras regiones del encéfalo aviar son idénticas a las de la corteza de los mamíferos. En 2002, un consorcio internacional de neurocientíficos revisó todas las pruebas y datos acumulados y dictaminó que las aves poseen en realidad un palio mucho más grande de lo supuesto hasta la fecha. Es, además, similar al de los mamíferos y comparte orígenes remotos con este.







PÁJAROS INTELIGENTES: un loro gris africano sucumbe a una ilusión (*1*), un cuervo grande maneja una herramienta (*2*) y una chara floridana demuestra su capacidad de retentiva (*3*).

ARLENE LEVIN-ROWE Y THE ALEX FOUNDATION (*1*); HELENA OSVATH (*2*); NICOLA CLAYTON (*3*)

No todo el palio de los mamíferos es corteza, pues abarca otros centros nerviosos, como el hipocampo o partes de la amígdala. Sigue siendo tema de debate qué extensión del palio aviar cumple la función de la corteza: algunos están convencidos de que la mayor parte es semejante a ciertas capas o tipos de células corticales, mientras que otros sostienen que la mayoría solo es análoga a la amígdala y a otras zonas no corticales del palio. Es importante subrayar aquí que es posible que estructuras cerebrales distintas de dos grupos zoológicos alejados desempeñen las mismas funciones en virtud de un proceso de evolución convergente. El área prefrontal constituye un ejemplo perfecto. La corteza prefrontal (CPF) de los mamíferos desempeña un cometido primordial en todas las facetas de la cognición avanzada.

Al inicio de los años ochenta, Jesper Mogensen e Ivan Divac, de la Universidad de Copenhague, describieron que una zona del palio posterior columbino era similar a la CPF de los mamíferos. Como esta fue la primera pista sobre la base neuronal de la cognición aviar, emprendí una serie de estudios aún en marcha en la que pudimos ver que esa región, denominada nidopalio caudolateral (NCL), es, como la CPF, una zona de encuentro entre las señales sensoriales aferentes (entrantes) y las señales motoras eferentes (salientes), las que ordenan al aparato locomotor que inicie una acción. A semejanza de la CPF, el NCL es un elemento esencial en todas las tareas cognitivas, pues sus neuronas codifican funciones cognitivas como la toma de decisiones, el cumplimiento de las normas diseñadas para los experimentos y la asignación de valores a las diversas opciones antes de hacer una elección.

Pese a las grandes similitudes entre el NCL y la CPF, los datos genéticos y sus ubicaciones respectivas en la parte más posterior y más anterior del palio hacen improbable que desciendan de un precursor común en las aves y los mamíferos. Más bien debieron de cumplir funciones bastante distintas en los antepasados remotos de ambos, pero a lo largo de 300 millones de años convergieron progresivamente hasta convertirse en áreas dedicadas de modo específico a la integración cognitiva de las señales sensoriales aferentes con las señales motoras

eferentes. Durante nuestra investigación, pienso a menudo en la famosa frase del Dr. Ian Malcolm en *Parque Jurásico*: «La vida siempre se abre camino». Dos grupos zoológicos distantes precisaban con premura una región encefálica que orquestase la cognición y ambos desarrollaron el área prefrontal de forma independiente.

Para explorar cómo una fisiología tan distinta acaba sustentando la misma función cognitiva, junto con Murray Shanahan, del Colegio Imperial de Londres y otros colaboradores, estudiamos el conectoma (o mapa de las conexiones nerviosas) del palio columbino. Como el palio aviar parece ser tan distinto de la corteza, esperábamos hallar un patrón de conectividad diferente. Después de la reconstrucción del conectoma de la paloma comprobamos con enorme satisfacción que las redes paliales (con áreas que se especializaban en funciones distintas) eran sorprendentemente similares a las de los mamíferos. Nuestra moraleja era simple: si en el curso de la evolución dos grupos zoológicos adquieren funciones mentales parecidas, también desarrollarán los mismos planos de conectividad, porque las funciones mentales semejantes parecen requerir redes similares.

Pero aún persiste una incógnita importante: ¿cómo consiguen las aves concentrar toda esa inteligencia en un cerebro tan pequeño? En busca de una respuesta, Seweryn Olkowicz y Pavel Němec, ambos en la Universidad Carolina, en Praga, y Suzana Herculano-Houzel, ahora en la Universidad Vanderbilt, y otros colaboradores calcularon el número de neuronas de 28 especies de aves. Se quedaron asombrados al descubrir que el cerebro de los córvidos y los psitácidos alberga el doble de neuronas de lo que cabría esperar por sus dimensiones. Como ese «excedente» se localiza mayoritariamente en el palio, su capacidad de cómputo supera a la de algunos monos cuyo cerebro es más grande.

Aunque posea más neuronas de lo esperado, las reducidísimas dimensiones del cerebro aviar conllevan que la cantidad de neuronas que acoge siga siendo mucho menor que el de los mamíferos de capacidades cognitivas parejas. El kea, un loro autóctono de Nueva Zelanda, posee 1280 millones de neuronas paliales, el cuervo grande 1200 millones y el chimpancé 7400 millones, pero las investigaciones no han dado muestras de que existan diferencias cognitivas relevantes entre ellos.

¿Cómo compensan esa desventaja numérica? Resulta que la mayor concentración de neuronas acorta las distancias entre ellas. En aquellas tareas en que la información va y viene de manera repetida entre los grupos de neuronas del cerebro densamente poblado, el tiempo ganado hace que las señales tarden menos en viajar de un punto al siguiente. A este respecto, junto con Sara Letzner y Christian Beste, de la Universidad Politécnica de Dresde, hemos visto que las palomas saben reaccionar más rápido que los humanos cuando llevan a cabo una tarea cognitiva particular. La densidad neuronal del palio aviar compensa la menor abundancia de neuronas proporcionando velocidades de ejecución más rápidas.

NUEVA MIRADA A LA INTELIGENCIA AVIAR

Cuando los especialistas de todo el globo comenzaron a desvelar las extraordinarias facultades cognitivas de las aves, la expresión peyorativa «cabeza de chorlito» perdió toda base científica. Ahora sabemos que su encéfalo se asemeja mucho más al de los mamíferos de lo que imaginábamos.

Esos descubrimientos nos brindan una visión más profunda de la cuestión. Para entenderla, primero hemos de reparar en que, independientes como son entre sí, aves y mamíferos han conquistado casi todos los nichos ecológicos que son capaces de sostener a un vertebrado en el planeta. Ambos se convirtieron asimismo en especies «generalistas», las cuales, lejos de depender de un ecosistema restringido, sobreviven casi en cualquier lugar. Las altas capacidades cognitivas fueron necesarias para hallar con rapidez soluciones a problemas nuevos y superar en viveza a los competidores. Así pues, la fuerte presión selectiva que recayó sobre estas dos clases de vertebrados dio como fruto habilidades mentales sumamente refinadas.

Además, los dos grupos lograron adquirir más inteligencia a través del desarrollo de mecanismos neurales casi idénticos, pese a la organización dispar del palio. Aves y mamíferos se volvieron más inteligentes aumentando la cantidad de neuronas. Los segundos lo hicieron agrandando el cerebro y las primeras incrementando la densidad neuronal. Ambos desarrollaron en el palio redes de conexiones notablemente parecidas y regiones «prefrontales» con características fisiológicas, neuroquímicas y funcionales idénticas. Lo mismo puede decirse de la cognición en sí. El modo en que ambos aprenden, recuerdan, olvidan, erran, generalizan y toman decisiones sigue principios idénticos. Esa asombrosa semejanza solo es posible cuando la naturaleza ofrece un grado de libertad estrictamente limitado para crear las estructuras neurales destinadas a la cognición compleja. Las aves y los mamíferos gestaron mecanismos neurales y modos de pensar similares; tomaron caminos distintos para acabar en el mismo lugar. IyC

PARA SABER MÁS

New Caledonian crows reason about hidden causal agents. Alex H. Taylor et al. en *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*, vol. 109, n.º 40, págs. 16.389-16.391, 2 de octubre de 2012.

Cognition without cortex. Onur Güntürkün y Thomas Bugnyar en *Trends in Cognitive Sciences*, vol. 20, n.º 4, págs. 291-303, 1 de abril de 2016.

Orthographic processing in pigeons (*Columba livia*). Damian Scarf et al. en *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*, vol. 113, n.º 40, págs. 11.272-11.276, 4 de octubre de 2016.

Ravens parallel great apes in flexible planning for tool-use and bartering. Can Kabadayi y Mathias Osvath en *Science*, vol. 357, págs. 202-204, 14 de julio de 2017.

EN NUESTRO ARCHIVO

La inteligencia de los cuervos. Bernd Heinrich y Thomas Bugnyar en *IyC*, junio de 2007.

Un ave ingeniosa. Carolynn L. Smith y Sarah L. Zielinski en *IyC*, junio de 2014.

Los animales también mienten. Barbara J. King en *IyC*, noviembre de 2019.

FÍSICA ESTADÍSTICA

La muchedumbre



EN JULIO DE 2013, un movimiento mal canalizado de la multitud produjo una situación de riesgo en un encierro de los sanfermines.

en ecuaciones

Físicos y matemáticos han desarrollado modelos de multitudes que describen la evacuación de un edificio o el tránsito de pasajeros en una estación

Bertrand Maury y Sylvain Faure



Bertrand Maury es profesor del Departamento de Matemáticas y Aplicaciones de la Escuela Normal Superior de París.



Sylvain Faure es ingeniero de investigación del Centro Nacional de Investigación Científica de Francia en el Laboratorio de Matemáticas de Orsay.



Pamplona, 13 de julio de 2013. Como cada día durante los sanfermines, a las ocho en punto de la mañana comienza el encierro. Corredores y toros marchan a buen paso hacia la plaza, donde por la tarde se lidiarán los toros. Pero justo ese día se forma un tapón humano al final del callejón de entrada al ruedo, donde quedan atrapados decenas de corredores. A pesar de que el acceso tiene varios metros de ancho, los protagonistas involuntarios de este drama se traban de manera tan inextricable que todos los esfuerzos por abrirse paso parecen contribuir a enmarañar aún más el montón que se ha formado. El balance es de 23 heridos, algunos de ellos graves.

Por desgracia, también hay veces en que el movimiento de una multitud a través de un cuello de botella provoca víctimas mortales, como sucedió a la entrada del puente Yamarat de La Meca en 2015, en otro puente de Nom Pen (Camboya) en 2010 o en la Love Parade de Duisburgo (Alemania) ese mismo año.

En los últimos decenios, el estudio y la modelización de las muchedumbres se han desarrollado considerablemente. La meta es comprender mejor estos sucesos funestos para tratar de evitarlos y garantizar así la seguridad de las personas en lugares cerrados (por ejemplo, facilitando la rápida evacuación de los edificios) o abiertos (como La Meca), y durante la celebración de eventos deportivos, culturales o políticos. Para entender esta materia tan particular, físicos, matemáticos, informáticos, sociólogos, psicólogos y etólogos han aunado esfuerzos. Y ya empiezan a recogerse los frutos. La modelización de los movimientos de personas ha irrumpido en diversos ámbitos: el diseño arquitectónico, la previsión de congestiones en lugares de gran afluencia, los cálculos para predecir los tiempos de espera, e incluso la creación de escenas virtuales dinámicas en videojuegos, películas y series.

DE LAS PARTÍCULAS A LOS PEATONES

A vista de pájaro, una muchedumbre parece un conjunto de pequeños granos. Así que resulta tentador considerar que las personas constituyen un sistema de partículas, sobre todo para los físicos o los matemáticos. Y es que los científicos llevan siglos tratando de comprender y predecir el movimiento de las partículas, y han hecho progresos considerables. El detonante fue la formalización de las leyes de la mecánica clásica por parte de Isaac Newton, en el siglo XVII. Gracias a estas leyes muy generales, sabemos escribir la ecuación que describe la posición a lo largo del tiempo de una partícula sometida a fuerzas externas, o incluso las ecuaciones de un sistema de partículas que interactúan, ya se trate de minúsculos granos apenas visibles o de planetas en interacción gravitatoria.

Es cierto que, en ocasiones, los sistemas de ecuaciones obtenidos a partir de estas leyes revisten tal complejidad que resulta muy difícil usarlos para predecir de manera precisa el movimiento de un conjunto de partículas. Mas esta dificultad no pone en entredicho la validez de las leyes de Newton, que se emplean en diversos campos. Por ejemplo, son estas

PÁGINAS ANTERIORES: GETTY IMAGES/MMEEE/ISTOCK

EN SÍNTESIS

La principal dificultad para estudiar los movimientos de una muchedumbre reside en el carácter imprevisible de los individuos que la componen.

Aun así, hay situaciones, como la evacuación de un local a través de una salida de emergencia, donde los resultados de los modelos son bastante buenos.

La integración de factores psicológicos dinámicos en este tipo de modelos todavía se encuentra en una fase incipiente, pero es un campo en plena ebullición.

Cada vez disponemos de más datos sobre las aglomeraciones, lo cual abre la puerta a las estrategias basadas en la inteligencia artificial, que presentan una gran capacidad predictiva.



LA SALIDA DE UN MARATÓN tiene lugar en varias fases. Los grupos de corredores avanzan por turnos hacia la línea, como el agua de un grifo que se abre y se cierra de manera intermitente. Los modelos macroscópicos de muchedumbres polarizadas describen muy bien esta situación.

GETTY IMAGES/PAVEL1964/ISTOCK (*maratón*); GETTY IMAGES/DPLIGHT/ISTOCK (*tigre*)

mismas leyes fundamentales las que conducen a las ecuaciones que rigen el movimiento de los fluidos, como el agua o el aire. Estas ecuaciones describen una realidad muy compleja e inestable, pero es posible resolverlas con un ordenador. Así se obtienen las predicciones meteorológicas a las que estamos tan habituados.

En suma, para los matemáticos y los físicos resulta completamente natural considerar a los individuos de una multitud como partículas. Pero ¿es realmente válido? En otras palabras, ¿existen leyes fundamentales que determinen el movimiento de las personas, como hacen las leyes de Newton con las partículas pasivas? Para ser sinceros, no: aunque conozcamos en un instante dado la posición y velocidad de todos los individuos de una muchedumbre aislada del resto del mundo, no podremos predecir cómo se moverá cada uno de ellos en el futuro. Ningún observador externo, aunque se tratara del mismísimo Isaac Newton, podría predecir la súbita reacción de alguien que, de camino a casa, da media vuelta al darse cuenta de que ha olvidado la cartera en la oficina. A pesar de todo, en ciertas situaciones es posible reproducir el comportamiento del grupo. Esos modelos requieren aproximaciones sobre la conducta de cada individuo, pero si son razonables, no introducen grandes errores en la predicción del movimiento conjunto. La clave está en dar con los parámetros adecuados.

Los modelos se elaboran como una receta de cocina. Se escogen los ingredientes y el modo de integrarlos y combinarlos, así como los parámetros que determinarán las propiedades gustativas del producto (los tiempos de cocción y de reposo, o la finura del corte). En los modelos de muchedumbres, los ingredientes básicos son las leyes elementales que rigen el movimiento de un individuo que interacciona con su entorno inmediato (tal y como él lo percibe).

El primer ingrediente, común a todos los modelos, consiste en definir una tendencia individual, o «velocidad deseada». Por ejemplo, en la evacuación de un edificio se considera que todo individuo intentará dirigirse a la salida por el camino más corto y a cierto paso, lo que define sin ambigüedades la velocidad deseada de cada persona en función del lugar donde se encuentre.

El segundo ingrediente, de importancia capital, se refiere a lo que acontece cuando dos personas se aproximan. Aquí entran

FUERZAS SOCIALES

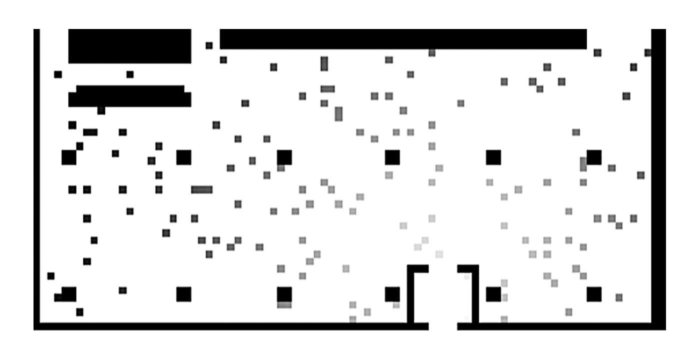
Guardar las distancias

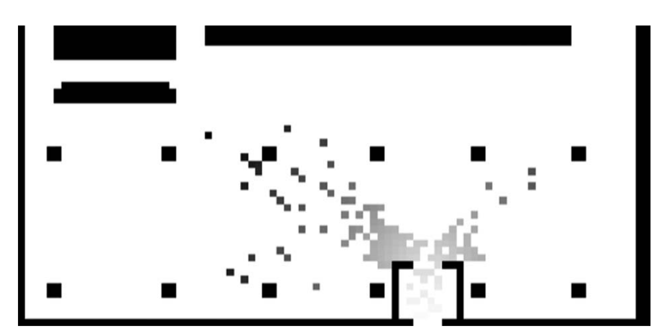
Todos tendemos a mantener una zona de seguridad alrededor nuestro. Los primeros trabajos científicos que formalizaron esta querencia y, más en general, la manera en que concebimos el espacio circundante, se remontan a principios de los años 1950. En esa época Heini Hediger, biólogo y director de varios zoológicos en Suiza, calculó el tamaño de la zona virtual que un animal considera «su espacio». Un aspecto notable de sus hallazgos es la consciencia tan precisa que tienen algunos animales, como los grandes felinos, de esa zona de intimidad: Hediger demostró que un intruso puede desencadenar una reacción de huida o de ataque por cuestión de centímetros.

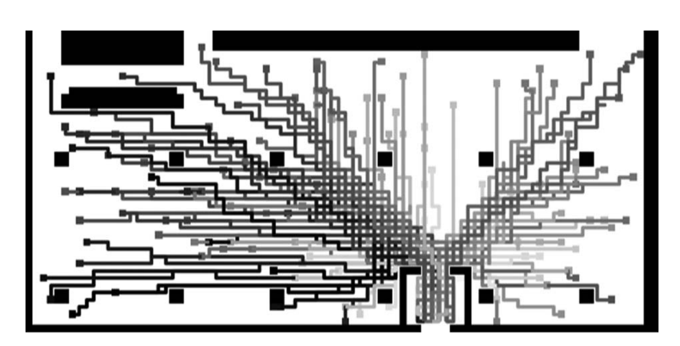
Algunos años más tarde, el antropólogo estadounidense Edward Hall extendió esta idea a los seres humanos. Sus investigaciones mostraron de manera cuantitativa nuestra tendencia a guardar una cierta distancia respecto a un vecino o un interlocutor, la cual es muy reproducible entre los individuos de un mismo grupo cultural. Esta distancia depende sobre todo del grado de intimidad entre las personas y de su estatus social. Hall relataba que, en 1960, John F. Kennedy se encontraba en una gran sala donde solía recibir a sus conocidos y a personalidades influyentes. Entre la concurrencia se extendió el rumor de que iba a ser el próximo presidente de Estados Unidos, y eso creó un vacío de una decena de metros en torno a él. Los presentes, aun estando habituados a un contacto directo y cercano con el joven senador, no se sentían autorizados a traspasar los límites de esa zona ficticia sino por invitación expresa del presidente en ciernes.

en juego tantos factores psicológicos, individuales y socioculturales que es difícil establecer una ley válida para cualquier par de individuos. Sin embargo, los investigadores coinciden en aceptar que, por lo general, todos tendemos a mantener cierta distancia con nuestros vecinos siempre que sea posible. Esa distancia depende sobre todo del grado de intimidad entre los dos individuos en cuestión.

Una vez reunidos estos ingredientes, hay que elegir un marco donde incorporarlos, que suele venir dado por una analogía con un sistema físico o matemático que se conozca bien. En el caso de las multitudes, físicos y matemáticos han propuesto diversos enfoques en los últimos decenios. Los microscópicos siguen a cada uno de los individuos, a los que de hecho identifican con partículas (si bien con propiedades especiales, dadas por nuestros dos ingredientes). Mientras, los enfoques macroscópicos describen la muchedumbre como un continuo: un líquido que fluye y se deforma bajo la acción de fuerzas externas e internas.







AUTÓMATA CELULAR: En los modelos de autómata celular, cada persona de la multitud se representa mediante un peón que se desplaza sobre una cuadrícula siguiendo ciertas reglas. Así, en el caso de una evacuación a través de una salida, el peón tiene una probabilidad mayor de moverse a una casilla que le aproxime a la puerta, pero no puede acceder a una casilla ya ocupada. Aquí vemos dos instantes de la simulación de una evacuación (*arriba*) y las trayectorias de los peones (*abajo*).

SYLVAIN FAURE Y BERTRAND MAURY

EL EFECTO DE LAS FUERZAS SOCIALES

Dirk Helbing, físico alemán de la Escuela Politécnica Federal de Zúrich, propuso en 1995 el primer modelo matemático de una muchedumbre, el cual era de tipo microscópico. En la década de 1970, al físico australiano Leroy Henderson se le había ocurrido usar la mecánica de fluidos para describir los flujos de viandantes en una calle, y esta analogía entusiasmó a los físicos que estudiaban el tema. De hecho, reproduce bastante bien los movimientos simples de una multitud muy densa, como los de una manifestación o los que efectúan los corredores en la salida de un maratón, como demostraron recientemente Nicolas Bain y Denis Bartolo, de la Escuela Normal Superior de Lyon.

Estos dos físicos estudiaron varios maratones, filmando desde arriba la zona acordonada que conduce a los participantes hasta la línea de salida. Como esta tiene lugar por fases, cada grupo de participantes debe avanzar y detenerse varias veces hasta que les llega el turno. A partir de un análisis detallado de la manera en que evoluciona la densidad de corredores, Bain y Bartolo validaron con gran precisión un modelo hidrodinámico de muchedumbre polarizada (es decir, donde todo el mundo avanza en la misma dirección), que predice la propagación de las ondas de parada y puesta en marcha observadas en la parte posterior de cada grupo de participantes.

A pesar de todo, la analogía con los fluidos se topa con dificultades cuando se pretende modelizar una multitud no polarizada, puesto que considera la muchedumbre en su conjunto, sin fijarse en cada individuo. En 1995, consciente de esta limitación, Helbing ponderaba otra analogía que tiene en cuenta los comportamientos individuales. Lo que hizo fue elaborar un formalismo microscópico similar al de Newton, según el cual los viandantes serían partículas con una cierta masa (como bolas de billar) sometidas a dos clases de fuerzas: una que representa la tendencia del individuo a adquirir su velocidad deseada y otra que engloba el conjunto de fuerzas ejercidas por los demás, las denominadas «fuerzas sociales». En el caso de una evacuación, la muchedumbre se comportaría como un conjunto de bolas de billar situadas sobre un plano horizontal y que experimentan a la vez a una fuerte atracción hacia un mismo agujero (la salida) y la repulsión de las bolas próximas, la cual da cuenta de nuestra tendencia a mantener cierta distancia con los que nos rodean. Este formalismo se sigue utilizando en programas informáticos comerciales destinados a modelizar el flujo de personas en estadios, estaciones o aeropuertos.

AUTÓMATAS CELULARES

Otro modelo muy utilizado es el del autómata celular, propuesto en 2001 por Carsten Burstedde y sus colegas de la Universidad de Colonia. Consiste en representar la zona de interés como una cuadrícula con casillas de unos 40 centímetros de lado, de modo que en cada una quepa solo una persona. Unos «peones» dispuestos sobre esta cuadrícula (cada casilla puede tener un peón o estar vacía) simbolizan las personas. En la versión más rudimentaria del modelo, en cada turno cada peón escoge al azar una de las casillas vecinas. La tendencia del individuo se tiene en cuenta asignando una probabilidad mayor a las casillas más cercanas a la puerta (en el caso de una evacuación) y la interacción con los demás se refleja en la imposibilidad de acceder a una casilla ya ocupada. Las ventajas de este modelo son su simplicidad conceptual y su facilidad de implementación. Pero la cuadrícula y el escueto tratamiento de las interacciones entre los peatones limitan su realismo.

Simulacros de evacuación

Los experimentos con multitudes permiten evaluar el efecto de la competitividad o de los obstáculos en el tiempo de desalojo de un local

ÁNGEL GARCIMARTÍN E IKER ZURIGUEL

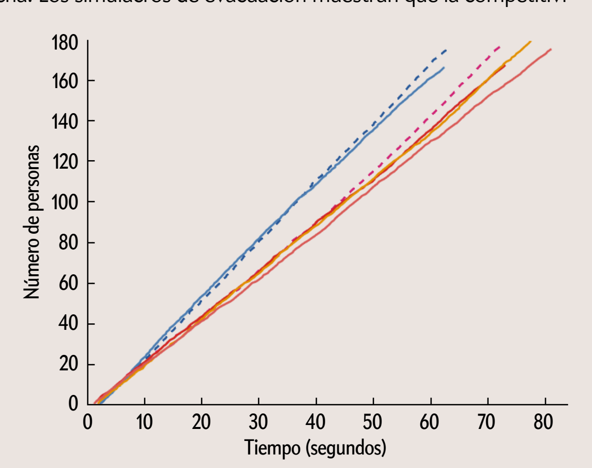
Para estudiar cómo se comportan las muchedumbres se requieren datos experimentales precisos. Los modelos matemáticos contienen parámetros libres que es necesario ajustar, ya que sus valores no se conocen de antemano. Por ejemplo, el modelo de fuerzas sociales del físico alemán Dirk Helbing posee cuatro de esas cantidades (como la velocidad a la que pretenden desplazarse las personas o el tamaño del espacio personal que desean guardar para sí), que además dependen de la situación: no es lo mismo entrar a un restaurante de postín que a un centro comercial en temporada de rebajas, o que desalojar un local en una situación de emergencia. Dado que los patrones de comportamiento solo suelen apreciarse en los promedios estadísticos, para obtener los valores de esos parámetros no basta con la observación fortuita o aislada de un solo caso: hay que realizar experimentos y repetirlos muchas veces en las mismas condiciones.



Los soldados del regimiento de infantería América 66 (acuartelado en Aizoáin, Navarra) durante un simulacro de evacuación. Un programa de análisis de imágenes permite identificar los gorros rojos y obtener la velocidad (*flechas amarillas*) de los soldados en cada fotograma del vídeo.

Nuestro equipo de la Universidad de Navarra lleva años analizando el comportamiento de una multitud al evacuar una sala de manera apresurada. Hemos elaborado programas informáticos que nos permiten obtener la posición y la velocidad de las personas en función del tiempo mediante el procesamiento de imágenes. De esta manera, se pueden medir el campo de velocidades, la densidad de personas por metro cuadrado en cada zona o el flujo instantáneo (el número de personas que atraviesan la puerta por unidad de tiempo).

Hemos comprobado que hay fenómenos que aparecen una y otra vez, en distintas situaciones y de manera reproducible: se trata de resultados muy robustos. Uno de ellos es el efecto *faster is slower* (cuanto más rápido, peor), el cual implica que, a mayor competitividad (cuantos más empujones haya), más se tarda en salir. La presión, que puede medirse con diversas técnicas, complica y alarga los atascos, lo que representa un grave peligro cuando el gentío pugna por escapar a través de una puerta estrecha. Los simulacros de evacuación muestran que la competitividad (por supuesto, sin llegar a situaciones peligrosas) afecta negativamente al flujo promedio.



En una evacuación, el número de personas que franquean la salida a lo largo del tiempo depende de si se empujan (*rojo*) o no (*azul*). Que haya un obstáculo (*líneas continuas, cada una corresponde a una posición de la barrera*) o no (*líneas discontinuas*) frente a la puerta no parece relevante. Cada línea es el promedio de varios simulacros.

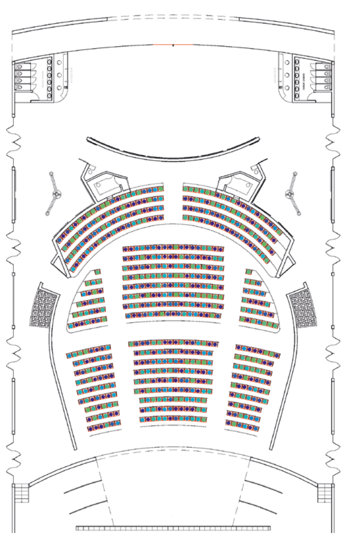
Para mitigar este problema, algunos investigadores propusieron colocar un obstáculo delante de la salida, con la creencia de que eso reduciría la presión cerca de la puerta y haría que los atascos durasen menos. Aun sin una confirmación experimental, se dio por buena esta idea y se procuraba que los modelos exhibieran el fenómeno. Sin embargo, todos los experimentos que hemos realizado (con diferentes grupos de personas, y cambiando el tipo y posición del obstáculo o el nivel de competitividad) han arrojado resultados negativos: la presencia de una barrera no acelera el desalojo.

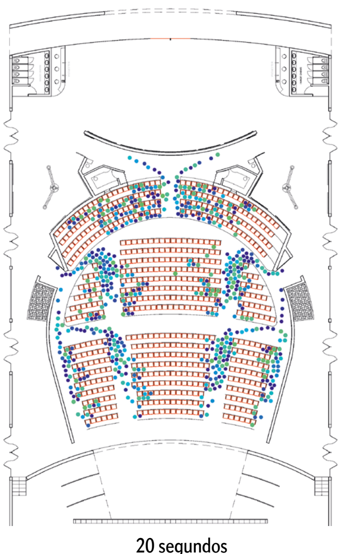
Obviamente, no hemos agotado las posibilidades y puede que un obstáculo de otra forma o tamaño, o situado en otro lugar, resulte efectivo. Daichi Yanagisawa y sus colaboradores de la Universidad de Tokio hallaron que una barra (mucho más fina que la columna que empleamos nosotros) descentrada respecto a la salida acortaba algo el tiempo de evacuación. Pero se trata de experimentos con pocas personas y que aún no han sido validados de forma independiente. Está claro que el efecto de un obstáculo es más complejo de lo que podría parecer a primera vista.

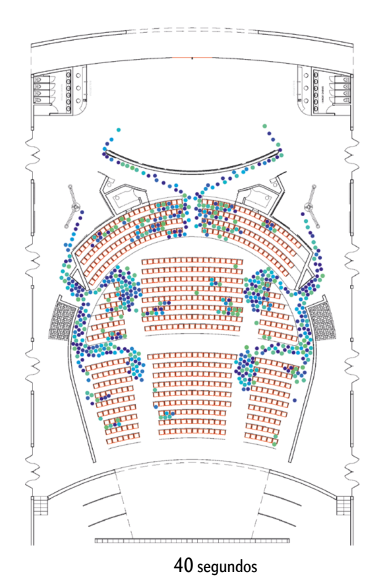
En la actualidad, diversos grupos de investigación de todo el mundo están aportando datos de gran calidad y profusamente documentados, precisamente con el ánimo de que las mediciones resulten útiles y posean un ámbito de aplicación bien definido. Y cada vez hay más experimentos públicos: por ejemplo, los investigadores del Centro de Investigación de Jülich, en Alemania, han creado un repositorio llamado Pedestrian Dynamics Data Archive (http://ped.fz-juelich.de/da) que permite descargar los vídeos y datos originales de muchos ensayos llevados a cabo en distintas condiciones.

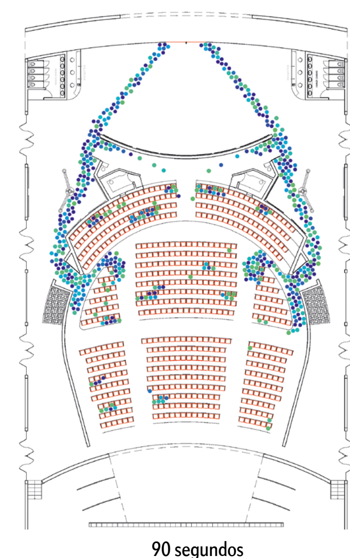
Ángel Garcimartín *e* ***Iker Zuriguel*** *son catedráticos del Departamento de Física y Matemática Aplicada de la Universidad de Navarra, e investigadores en el Laboratorio de Medios Granulares de la misma universidad.*

FUENTE: «REDEFINING THE ROLE OF OBSTACLES IN PEDESTRIAN EVACUATION», POR A. GARCIMARTÍN ET AL. EN *NEW JOURNAL OF PHYSICS*, VOL. 20, ART. 123025, 2018 (*gráfica*) ÁNGEL GARCIMARTÍN E IKER ZURIGUEL (*soldados*)


0 segundos


20 segundos


40 segundos


90 segundos

MODELO GRANULAR: Este tipo de modelos son capaces de reproducir el desalojo de un teatro (la imagen muestra varias etapas de una simulación). El conjunto de los parámetros que describen las posiciones de los espectadores constituye una especie de gota que, en cada instante, busca descender lo más eficazmente posible por la pendiente de un hipotético paisaje multidimensional, caracterizado por la suma de las distancias de cada persona a la salida y las restricciones respecto a su posición.

SYLVAIN FAURE Y BERTRAND MAURY

Hace unos diez años, propusimos una nueva estrategia junto a Juliette Venel, que por entonces hacía su tesis en nuestro laboratorio. Este enfoque, que aún seguimos desarrollando, parte de un principio muy general: el de la máxima pendiente, que describe, por ejemplo, el movimiento de una gota de agua que fluye cuesta abajo buscando la trayectoria con mayor declive. Matemáticamente, se sigue la posición de la gota sobre un mapa a lo largo del tiempo (así pues, se trata de un punto en el plano) y la altitud se representa mediante una función de dicha posición (del mismo modo que la altitud sobre la superficie terrestre es una función de la latitud y la longitud). En cada instante, la gota tiende a descender tanto como pueda, de modo que busca la dirección con la máxima pendiente de la función altitud. (La pendiente no es sino el gradiente de la función, es decir, su derivada respecto a la posición.)

UNA GOTA DE GENTE

Para una multitud, esa «gota» es el conjunto de parámetros que describen las posiciones de todos los individuos, de manera que el modelo queda completamente determinado por una cantidad que hace las veces de altitud y que la muchedumbre tiende a minimizar. En el caso de una evacuación, resulta natural definir esa cantidad como una insatisfacción global o, de modo más preciso, como la suma de las distancias de las personas a la salida, expresión a la cual se añaden otros términos que dan cuenta de las interacciones. Uno de ellos, en particular, toma un valor muy elevado cuando dos personas comienzan a superponerse (a intentar ocupar el mismo espacio), cosa que prohíben tanto las leyes de la física clásica como la decencia. Una vez que la cantidad a minimizar queda bien definida, es bastante fácil dejar que la muchedumbre, identificada ahora con un único punto en un espacio de muchas dimensiones, fluya por ese paisaje virtual. Como las superposiciones están estrictamente prohibidas, este modelo describe la muchedumbre como una colección de esferas (o granos) rígidas, y por eso recibe el nombre de modelo granular.

Pese a su tosca representación del comportamiento humano, este tipo de modelos proporcionan una descripción bastante satisfactoria del movimiento de la gente en muchas situaciones, sobre todo en aquellas donde conocemos bien las tendencias individuales, como una cola, un cruce o la evacuación a través de una puerta estrecha. Este último escenario, un caso clásico de estudio, se usa a menudo para evaluar las virtudes de un modelo en condiciones de alta densidad. Con la ayuda de experimentos bien documentados, se comparan los resultados del cálculo con las observaciones. Para cada uno de los modelos microscópicos que hemos mencionado, diversos equipos han logrado reproducir los experimentos de manera precisa, incluidas las sutiles propiedades estadísticas que cumple la distribución de los intervalos de tiempo entre las salidas consecutivas de dos individuos.

En el contexto de la evacuación a través de una puerta estrecha, hay algunos fenómenos que han despertado la curiosidad de los científicos. Entre ellos destaca el efecto *faster is slower* (cuanto más rápido, peor), analizado por varios equipos desde hace un par de decenios. En condiciones de elevada competitividad, se observa que si los individuos se precipitan en gran número hacia la puerta, en ocasiones se produce una ralentización de la salida, e incluso se llega al atasco. Una manifestación espectacular, y en cierta manera inversa, de este efecto es la mejora en el tiempo de evacuación que parece darse en determinadas circunstancias si se coloca un obstáculo antes de la salida. La relación entre ambos fenómenos es clara: la barrera tiende a frenar a algunas personas y conduce a un desalojo más rápido (cuanto más lento, mejor). Varios grupos han estudiado experimentalmente este último escenario, tanto con peatones como con animales (sobre todo ovejas), aunque no siempre han obtenido resultados positivos [*véase el recuadro* «Simulacros de evacuación»].

Este tipo de efecto paradójico aparece en diversas situaciones y no se circunscribe a los movimientos colectivos. Así, la ley de Yerkes-Dodson establece que el rendimiento de un individuo mejora conforme aumenta el nivel de tensión al que está sometido, pero solo hasta cierto umbral, a partir del cual la tensión

se torna contraproducente. También encontramos ejemplos en la física de los objetos inanimados. Así, los físicos han descubierto que una gota de un fluido viscoso que desciende por una superficie rugosa puede frenarse si se incrementa la gravedad: eso deforma y aplasta la gota, con lo que crece el área de fricción.

La muchedumbre se puede modelizar como una gota que resbala cuesta abajo siguiendo la dirección de máxima pendiente

LA FRICCIÓN ENTRE INDIVIDUOS

Puede que este sencillo ejemplo no esté tan alejado de las muchedumbres, consideradas de nuevo como gotas que resbalan pendiente abajo. De hecho, la mayor parte de los modelos que hemos descrito manifiestan el efecto *faster is slower* siempre que se introduzca un elemento de fricción en las interacciones. ¿Cómo se procede exactamente? Consideremos el modelo del autómata celular. La idea consiste simplemente en echar a suertes la casilla de la cuadrícula a la que quiere mudarse cada uno de los individuos identificados con un peón, sin tener en cuenta los movimientos de los demás. Esta primera etapa a veces genera conflictos, cuando dos personas se disputan la misma casilla. Para modelizar la fricción entre individuos, se decide que en caso de conflicto existe una probabilidad no nula (un número entre 0 y 1 que constituye un parámetro esencial del modelo) de que nadie se desplace a esa casilla, es decir, de que los dos (o incluso tres) competidores permanezcan en su posición inicial. Es evidente que aumentar la propensión de los individuos a avanzar a toda costa incrementará el número de conflictos y acabará por ralentizar a la multitud. Y, en efecto, esta variante del autómata celular reproduce el «cuanto más rápido, peor» de manera satisfactoria.

No obstante, aún se debate sobre las causas de este fenómeno. El modelo granular de pendiente máxima no incluye ningún término de fricción y, sin embargo, también lo manifiesta e incluso proporciona una posible explicación, si consideramos las repercusiones positivas de un obstáculo. Pensemos de nuevo en una gota que resbala pendiente abajo, y supongamos que se queda atrapada en un pequeño bache que se encuentra en su camino. Si colocamos un obstáculo con el perfil adecuado antes del bache, la gota se verá obligada a sortearlo y podrá seguir su ruta hacia el valle. La gota atrapada en el bache corresponde a un atasco de la muchedumbre, y el obstáculo permite evitar este tipo de trampas.

Por lo tanto, ambos modelos (el del autómata celular y el granular) presentan este efecto paradójico, a pesar de basarse en ingredientes muy distintos. Esto ilustra una dificultad general inherente a la elaboración de modelos: no basta con reproducir un fenómeno para identificar sus causas de manera inequívoca.

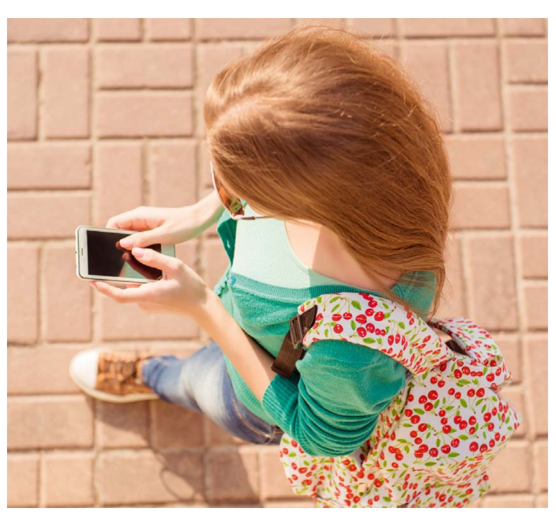
En estos últimos años, la aún joven ciencia de la modelización de los movimientos de la gente ha alcanzado éxitos es-

TECNOLOGÍA

Sonría, le están siguiendo

Los métodos para seguir el movimiento de las muchedumbres han evolucionado mucho en los últimos decenios. Aunque aún se emplea el recuento manual en algunas circunstancias, cada vez se recurre más a los sensores de flujo. Su principio de funcionamiento es bastante sencillo: una cámara en la vertical de un recinto graba un vídeo de la multitud, el cual se analiza para contar el número de personas que atraviesan una línea virtual definida por el usuario. Los nuevos sistemas 3D, equipados con dos cámaras, pueden incluso elaborar un mapa de alturas (del mismo modo que nuestros dos ojos nos permiten evaluar las distancias a los objetos que miramos), lo cual asegura precisión y robustez en el recuento al permitir distinguir los niños de los adultos, así como las maletas y otros objetos.

En mecánica de fluidos, un procedimiento de este tipo se denomina euleriano: da información (relativa a distintos individuos) sobre lo que pasa a lo largo del tiempo en un punto fijo del espacio. Pero gracias a las nuevas tecnologías, ahora también se dispone de información lagrangiana, es decir, acerca de los desplazamientos de una determinada persona. Los teléfonos móviles inteligentes se pueden localizar permanentemente, gracias a su receptor GPS y a los accesos automáticos a las redes wifi cercanas. Esta localización suele fallar en el interior de los edificios, pero instalando en ellos pequeñas balizas *bluetooth* (transmisores de baja energía), se recupera la capacidad de seguimiento con una precisión de algunos metros. Si el muestreo de la posición se hace de manera regular (cada 10 o 20 segundos), es posible reconstruir la trayectoria de la persona y saber así dónde se detuvo, o incluso deducir sus intereses y ciertos aspectos de su modo de vida.



GETTY IMAGES/DEAGREEZ/ISTOCK

Este tipo de funcionalidad está extremadamente regulada. En algunos países, un seguimiento así solo puede llevarse a cabo en condiciones de estricto anonimato: el carácter lagrangiano del rastreo se asegura (al menos durante algunos días) mediante un identificador asociado al móvil, sin que pueda conocerse ni registrarse la identidad de la persona que lo lleva.

pectaculares y se ha ido extendiendo poco a poco a ámbitos muy diversos. El modelo de fuerzas sociales se ha integrado en programas comerciales que sirven, por ejemplo, para calcular el flujo de turistas bajo la torre Eiffel o los movimientos de pasajeros en los grandes nodos de tránsito. También es cada vez más habitual que el diseño de proyectos arquitectónicos incluya simulaciones de los flujos de viandantes a través de los espacios aún por construir. Y se ha generalizado el uso de estos modelos para hacer más realistas los movimientos de los personajes de las películas o los videojuegos: por ejemplo, las escenas de las batallas de *El señor de los anillos* o *Juego de tronos*, en las que participan numerosas criaturas con capacidades cognitivas parecidas a las nuestras, han sido creadas con la ayuda de modelos de muchedumbre específicos.

En todos los casos citados, las tendencias espontáneas de los individuos resultan bastante sencillas de describir, ya sea porque son previsibles (como en la evacuación de un edificio o el tránsito de pasajeros en una estación) o porque existe un escenario establecido de antemano (como en las películas de animación). En situaciones más generales, que mezclan individuos con diversas querencias e interacciones complejas, los modelos actuales se topan con limitaciones y todavía hay que superar numerosos retos.

En primer lugar, la integración de factores psicológicos dinámicos en dichos modelos se encuentra aún en un estadio inicial. Un petardo que explota en medio de la turba puede provocar una estampida que, hoy por hoy, es muy difícil de tratar. La misma noción de pánico resulta problemática, puesto que su aparición y evolución varían mucho de una persona a otra, y tampoco se entiende bien cómo se propaga en el seno de una muchedumbre densa. Los modelos sí que permiten reproducir a posteriori una reacción de pánico que se haya grabado, pero elaborar un modelo general de movimiento que prediga lo que sucederá en un amplio abanico de situaciones de este tipo todavía está fuera de nuestro alcance.

DE LOS PEATONES A LA TEORÍA DE JUEGOS

En segundo lugar, la interacción de los individuos con un medio potencialmente hostil requiere conjugar estos modelos con otras variables, como puede ser la visibilidad reducida a causa del humo en el caso de un incendio. Y también resulta difícil plasmar en ecuaciones la capacidad individual de desarrollar estrategias (incluso de manera inconsciente) para sortear obstáculos y optimizar la trayectoria. Cada persona elabora un proyecto de trayectoria para los segundos venideros, basado en la intuición de lo que harán el resto de viandantes. Así que su comportamiento se basa en un proceso de negociación más o menos consciente, que en algunos aspectos es reminiscente de la teoría de juegos: la ganancia que se obtiene con una determinada estrategia depende de la que sigan los demás. Es previsible que en los próximos años se multipliquen los esfuerzos por incorporar estos aspectos en los modelos, lo que mejorará su capacidad predictiva.

Por otro lado, el reciente y considerable aumento en los datos sobre los movimientos de personas abre la puerta a otros enfoques de modelización que, en vez de centrarse en formalizar fenómenos bien conocidos, se guíen por los propios datos. A pesar de lo frustrante que puede ser para los científicos alejarse de una teoría fenomenológica y causal, estos procedimientos aún incipientes y basados en técnicas de aprendizaje profundo presentan un notable poder predictivo y seguramente no tarden en transformar esta área, que ya está en plena ebullición. En los próximos años no hay que descartar que se generalice, como ya ha ocurrido con el tráfico rodado, un «pronóstico de las aglomeraciones» que nos indique el nivel de congestión en cada parte de una ciudad.

VÍSTEME DESPACIO, QUE TENGO PRISA: Cuando una multitud se apresura hacia una salida, cerca de ella se producen fuerzas que ralentizan o incluso detienen la evacuación, un efecto que se conoce con la expresión inglesa *faster is slower*. La figura ilustra este fenómeno en sucesivos momentos de un desalojo (*izquierda*) a partir de un modelo granular (los tonos más rojos indican mayor presión). Por el contrario, cuando se coloca un obstáculo frente a la salida (*derecha*), el flujo parece mucho más eficiente.

PARA SABER MÁS

Social force model for pedestrian dynamics. Dirk Helbing y Péter Molnár en *Physical Review E*, vol. 51, págs. 4282-4286, mayo de 1995.
Crowds in equations. Bertrand Maury y Sylvain Faure. World Scientific, 2018.
Fouloscopie: Ce que la foule dit de nous. Mehdi Moussaïd, HumenSciences, 2019.
Dynamic response and hydrodynamics of polarized crowds. Nicolas Bain y Denis Bartolo en *Science*, vol. 363, págs. 46-49, enero de 2019.

EN NUESTRO ARCHIVO

Movimiento de masas. Tobias Kretz en *MyC* n.º 48, 2011.
La universalidad de los atascos. Iker Zuriguel y Angel Garcimartín en *IyC*, mayo de 2015.

por Marc Boada Ferrer

Marc Boada Ferrer es divulgador científico y experto en ciencia experimental.



Las figuras de Lissajous

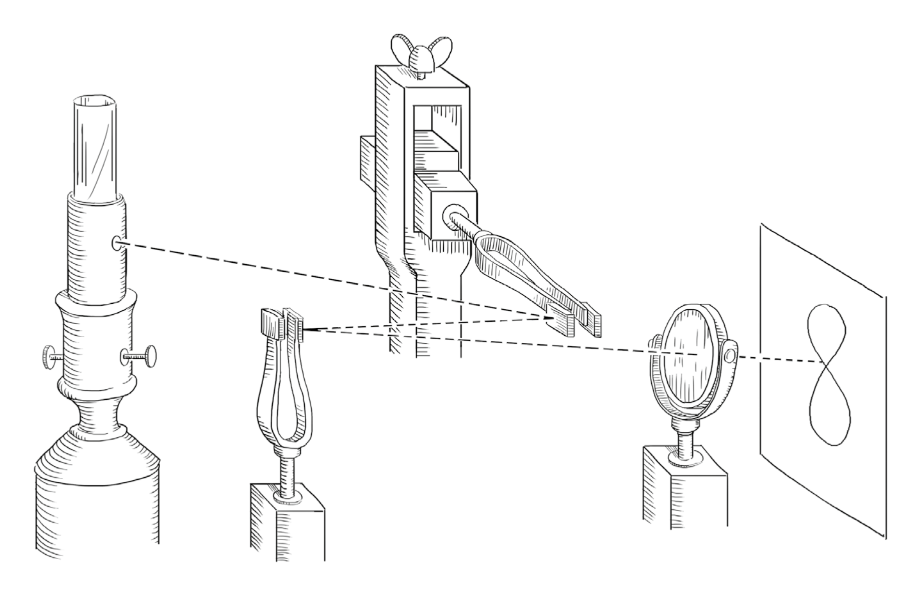
Un clásico y bello experimento, a la luz de las técnicas actuales

A mediados del siglo XIX, Jules Antoine Lissajous presentó a la Academia Francesa un informe sobre unas curvas que había estudiado a la luz —y nunca mejor dicho— de nuevas técnicas. En esencia, lo que hizo Lissajous fue encontrar un método para visualizar la curva que generaba la combinación de dos movimientos armónicos simples.

Para ello tomó un par de diapasones idénticos, fijó en cada uno un ligero espejo (en uno de los brazos) y reflejó sobre ellos un fino haz de luz perfectamente colimado. Al proyectar este sobre una pantalla, previa reflexión sobre los diapasones en vibración, se formaba una interesante imagen que seguro que todos hemos visto alguna vez.

Observemos que los dos diapasones forman un ángulo de 90º, de forma que ambos aportan una de las dos componentes necesarias para trazar una curva bidimensional cerrada. Gracias a este simple montaje, Lissajous no solo pudo estudiar el aspecto de diversas frecuencias, y de combinaciones de estas, sino también —y más interesante todavía— ahondar en el estudio de las interferencias producidas por los desfases en la vibración de los diapasones.

Debemos aclarar que estas imágenes son idénticas a las que obtenemos en la pantalla de un osciloscopio cuando combinamos dos señales, y similares a las que podemos trazar con un péndulo compuesto de los que suelen hallarse en los museos de ciencia. Me refiero al péndulo de Lissajous, un embudo lleno de arena (o pintura, en otras versiones), que oscila siguiendo una trayectoria elíptica mientras vierte un fino hilo de arena y traza, por tanto, bellísimos dibujos. De hecho, existe todo un universo de posibilidades experimentales relacionadas con las curvas de Lissajous: armonógrafos, péndulos dobles acoplados e incluso mecanismos con manivelas o engranajes, que dibujan unos perfectos armonigramas.



EL APARATO DE LISSAJOUS

MARC BOADA FERRER SEGÚN *TRATADO ELEMENTAL DE FÍSICA*, A. GANOT, 1870

En esta ocasión nos proponemos replicar el experimento de Lissajous siguiendo los pasos de nuestro predecesor Jearl Walker, que lo publicó hace 40 años en esta misma sección. Eso sí, lo haremos a la luz de los materiales hoy disponibles en el mercado y, además, con un coste irrisorio. Empecemos con la disposición más básica posible.

Los diapasones decimonónicos, aún en venta, son unas finas y delicadas piezas metálicas que gozan de un sonido cristalino y puro, limitado a una sola frecuencia. Sin embargo, tienen un inconveniente: son caros. Los diapasones actuales más comunes (no los de uso profesional) son mucho más asequibles, pero, al ofrecer un volumen reducido, no nos sirven para este experimento. Así que utilizaremos como fuente de sonido unos sencillos y baratos altavoces externos de ordenador (obviamente, tendremos que modificarlos, pero serán alteraciones temporales y reversibles).

Nos interesan los altoparlantes típicos, los que tienen la membrana desprotegida, accesible y con un diámetro de unos 4 centímetros. Si bien no podemos esperar vibraciones puras como las de los diapasones metálicos, los altavoces ofrecen dos ventajas esenciales: la continuidad del sonido y la posibilidad de regular el volumen —algo que en el siglo XIX era casi ciencia ficción—.

Dispondremos los altavoces sobre una madera plana en la que también montaremos un puntero láser. Podemos utilizar un tubo láser de helio-neón (como hizo Walker hace 40 años), pero su precio es hoy literalmente prohibitivo. Por suerte, hoy contamos con alternativas mucho más asequibles. En nuestro dispositivo hemos utilizado un láser verde, muy potente y barato, que permite grandes distancias de proyección. Pero sirve casi cualquier puntero, incluidos los que venden en los bazares orientales por un par de euros.

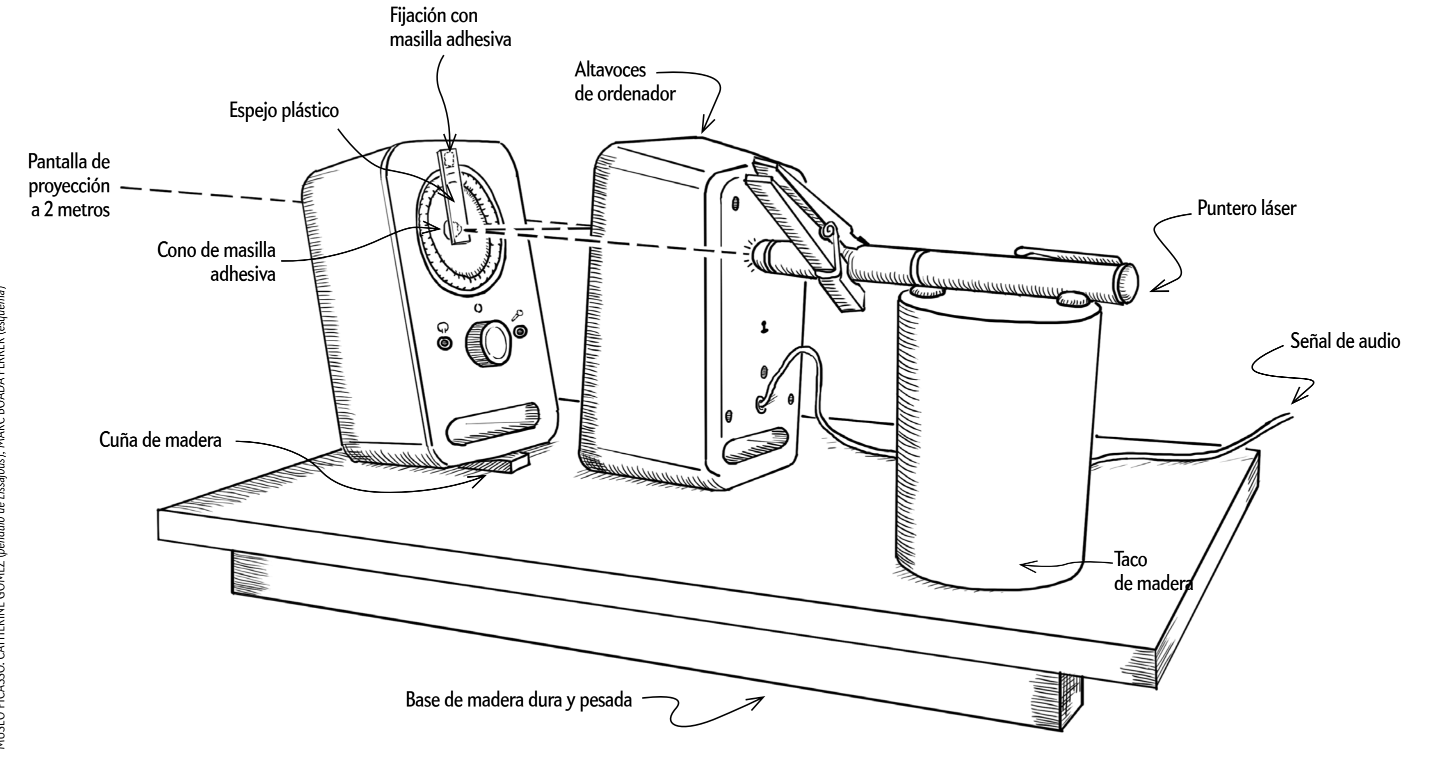
Situaremos el láser sobre un taco de madera suficientemente alto como para que el haz de luz incida en el centro de la membrana de uno de los altavoces. Observemos que estamos construyendo un



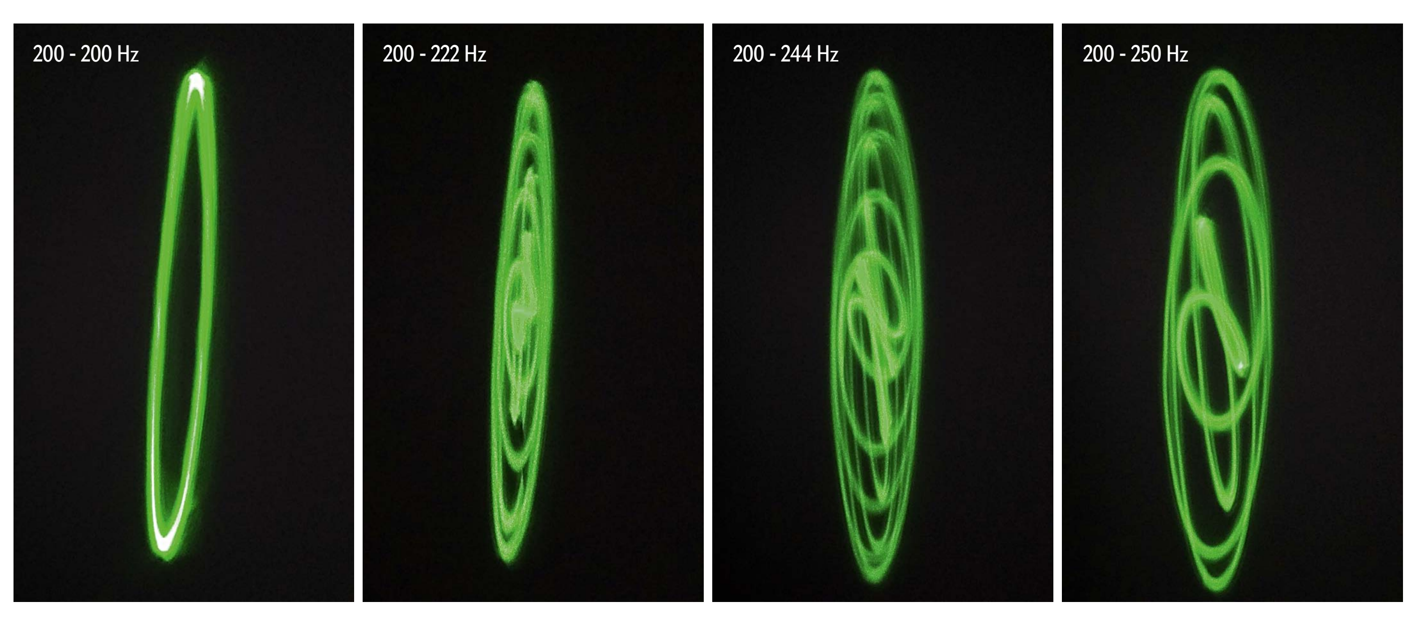
MEDIANTE EMBUDOS CON ARENA NEGRA, los participantes de una actividad ideada por el artista Juan Escudero dibujaron figuras de Lissajous en el salón de actos del Museo Picasso de Barcelona.

banco óptico, pero recordemos, también, que nos hemos propuesto una máxima económica de precio. Así que, para fijar los elementos, utilizaremos esa masilla de color azul, adherente pero reversible, con la que fijamos fotos y pósteres a la pared (Blu-Tack). Amasaremos esta sustancia con los dedos hasta formar un pequeño cilindro, que dispondremos entre el láser y el taco de madera. Para mantener nuestro puntero en funcionamiento sin tener que estar pulsando el interruptor continuamente, colocaremos una pinza para tender ropa de forma que presione el botón. Finalmente, si disponemos de un soldador de estaño para componentes electrónicos, soldaremos a los contactos eléctricos del portabaterías una fuente de alimentación (sirve un transformador universal regulado a 3 voltios), de forma que será innecesario cambiar las pilas del puntero.

Volvamos a los altavoces. Necesitamos que, al reflejarse en las membranas de estos, el haz láser adquiera movimiento en dos ejes, es decir, en dos componentes perpendiculares entre ellos. Lamen-



MUSEO PICASSO. CATHERINE GÓMEZ *(péndulo de Lissajous)*; MARC BOADA FERRER *(esquema)*



FIGURAS DE LISSAJOUS obtenidas mediante la combinación de una frecuencia de 200 herzios y otra de entre 200 y 400 herzios. (Solo cuando el cociente de las frecuencias es un número racional las curvas son cerradas.)

tablemente, la membrana del altavoz se mueve solo adelante y atrás, y, por tanto, deberemos pergeñar algún mecanismo que convierta este desplazamiento lineal en uno angular. La solución es fácil: basta con añadir una tira de espejo plástico, que podemos fabricar a partir de las láminas reflectantes que se utilizan para reparar retrovisores y que venden en cualquier bazar oriental o tienda de recambios de automóvil.

Recortaremos un rectángulo de espejo plástico de un centímetro de ancho y varios de longitud. Pegaremos (también con Blu-Tack) un extremo a la carcasa del altavoz y el otro a la membrana. Para asegurar un buen contacto con la membrana, pondremos en el centro de esta un pequeño cilindro de masilla adhesiva y, con delicadeza, presionaremos encima suavemente el espejo hasta que se mantenga unido. Y otro detalle importante: como queremos conjugar dos componentes perpendiculares, en un altavoz pondremos la lámina en posición vertical y en el otro horizontal. Cuando las láminas espejadas se encuentren en su sitio, retiraremos la película que las protege y, a partir de entonces, no las volveremos a tocar con los dedos.

Llega ahora el momento de hacer los ajustes pertinentes para que el láser se refleje en los espejos y se proyecte sobre una pantalla. Como el avispado lector ya imagina, la cosa no es fácil. Procederemos, por tanto, por aproximaciones sucesivas: mediante un primer montaje totalmente provisional determinaremos las posiciones óptimas de los elementos; luego, en una segunda fase, los fijaremos con más detenimiento.

Si miramos el esquema, veremos que los ejes ópticos de los espejos trazan ángulos muy agudos y que los altavoces están separados unos pocos centímetros. El motivo es simple. Si la distancia entre los espejos es grande, el haz láser puede moverse con tanta amplitud después de la reflexión en el primer espejo que desborde el tamaño del segundo. Naturalmente, podríamos utilizar espejos de mayor tamaño, pero es deseable que sean pequeños para que no introduzcan demasiadas perturbaciones en la lámina del altavoz y, por tanto, en la calidad del sonido.

Por otro lado, los altavoces suelen hallarse inclinados para facilitar la proyección del sonido. Así pues, introduciremos bajo su base unas cuñas que nos aseguren la verticalidad de los espejos. Podemos adquirir unas excelentes cuñas de madera de haya o de plástico transparente en las ferreterías o, en su defecto, recortar y lijar la parte proximal de la típica pinza de tender la ropa. Sigamos.

A oscuras, encendemos el láser y hacemos rotar el taco que lo soporta sobre la base de madera. Nos detendremos cuando el punto de luz incida en las proximidades del eje del primer espejo. Comprimiendo suavemente el láser sobre el taco al que está unido con la masilla de fijación, regularemos su altura hasta hacer diana justo en el centro del espejo. Ahora, giremos el primer altavoz hasta que el haz de luz incida en el espejo del segundo. Comprobaremos que es necesario retocar la posición del primer altavoz y que, a continuación, deberemos retocar la inclinación del láser.

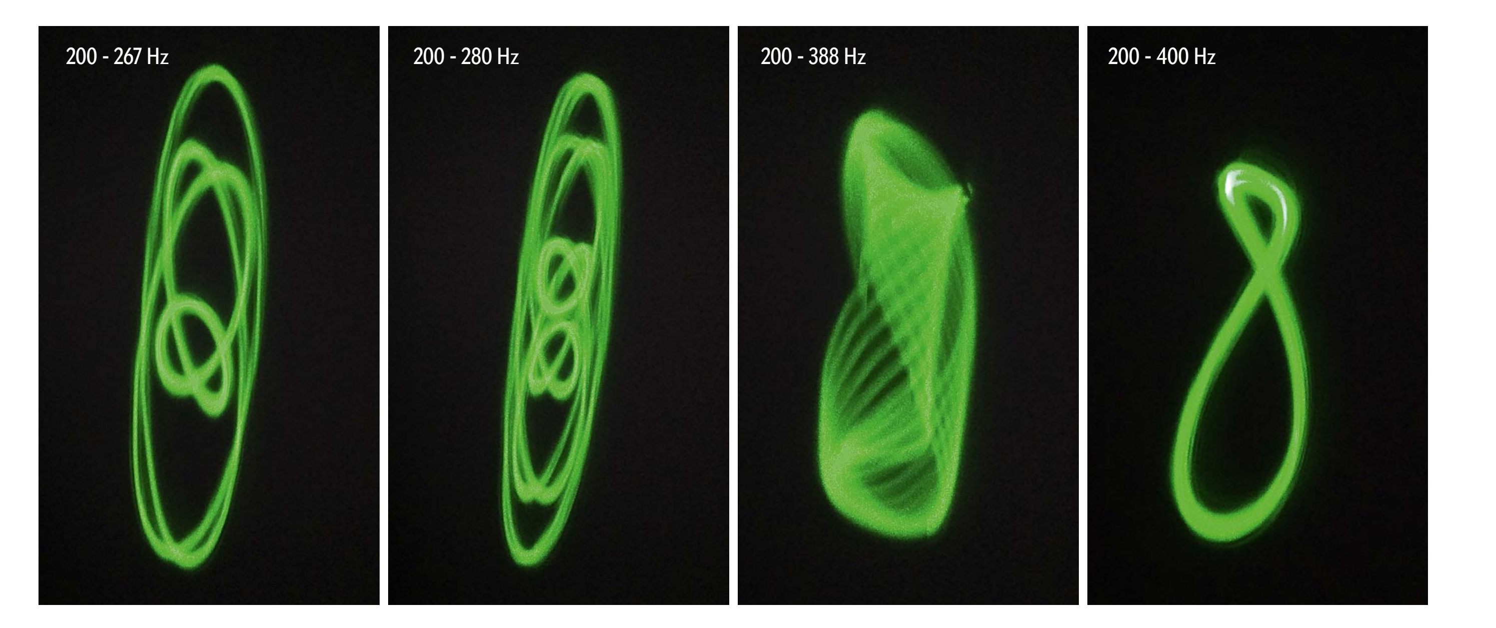
Reiterando esta operativa de forma sucesiva y procediendo con una delicadeza cada vez mayor, conseguiremos la alineación perfecta. Los experimentadores inquietos o impacientes pueden ayudarse colocando unos conos de incienso o unas varitas de sándalo en las proximidades del trayecto óptico. Con ello conseguirán dos cosas. La primera, visualizar fácilmente el rayo láser, lo que simplifica mucho la colimación. La segunda, que su laboratorio huela como un monasterio tibetano.

Volviendo de nuevo a las fases previas, llega el momento de rotar todo el montaje para que el haz se proyecte sobre una pantalla lo suficientemente grande y, atención, lejana.

En el instrumento que aquí mostramos, la distancia hasta la pantalla era de dos metros. En estas condiciones, un láser de 10 milivatios y un sonido de volumen moderado forman una imagen brillante en una pantalla cuadrada de 30 centímetros.

Hablemos ahora del sonido. Nuestro objetivo es visualizar frecuencias, combinaciones de estas o de sus amplitudes, convirtiendo altavoces en generadores de movimiento de unos espejos. Por tanto, el volumen al que operen estos marcará la amplitud o tamaño de la figura. Si hacemos funcionar los altavoces a su máxima potencia, el movimiento de las membranas será muy amplio, el haz láser describirá un abanico mayor y la imagen ganará en tamaño. Pero, atención, también los vecinos y familiares oirán nuestro expe-

MARC BOADA FERRER



rimento acústico. En ese sentido, mucho hemos avanzado desde que en esta revista Walker se propusiera la obtención de figuras de Lissajous. Entonces, para producir las frecuencias se utilizaban costosos generadores. Hoy, en cambio, podemos hallar en la Red y descargar gratuitamente un generador de frecuencias en línea que satisfaga todas nuestras necesidades para este proyecto, incluidas formas de onda cuadradas, sinusoidales, triangulares y en diente de sierra. La lástima es que estos sonidos ululantes y monótonos resultan a veces un poco molestos para el vecindario. Por ello recomiendo realizar las primeras pruebas con música.

Conectemos nuestro ordenador y busquemos en alguna plataforma de música una pieza que nos guste. Conectemos los altavoces y el láser, oscurezcamos el laboratorio y proyectemos el haz sobre una pantalla blanca.

Ahora subamos el volumen progresivamente. Ante el asombro del experimentador, sobre la pantalla empezarán a proyectarse extrañas figuras que ganarán o perderán tamaño al ritmo de la música. Superada la sorpresa inicial, comprobaremos que, en función de nuestros gustos musicales, la figura puede ser, o no, de gran belleza (algo similar ocurre si sintonizamos emisoras de radio en la Red, puesto que cada locutor dará lugar a una figura u otra según su voz). La música estridente, sincopada o cacofónica aporta poco. En cambio, los sonidos de una flauta, de una trompeta en un largo solo, o, mejor aún, los que emite un lama tibetano cuando modula su voz a una frecuencia bajísima y varía el tono lentamente, solo pueden ser clasificados como de espectáculo sonoro —un espectáculo acrecentado sinestésicamente por los residuos aromáticos del incienso quemado en la fase de colimación—.

Bromas aparte, este es un buen momento para proceder a los ajustes finales en cuanto a la inclinación y orientación de los elementos ópticos. Luego, fijaremos con una pistola de silicona caliente todos los elementos a la base de madera. Asegurémonos de que el montaje vibra lo mínimo. Presionemos la base contra la mesa de soporte para ver si se reducen las vibraciones. ¿Se observa alguna mejora en la imagen? ¿Queda más perfilada? De ser así, coloquemos algún bloque pesado que aumente la inercia y reduzca los acoplamientos entre altavoces y base. Terminada esta fase de ajuste musical, podemos proceder a la más científica.

Conectémonos ahora los altavoces a un generador de frecuencias en línea. De nuevo, subamos el sonido a límites aceptables por los vecinos y variemos de modo continuo la frecuencia. A determinados valores, la figura adquiere movimiento propio, trazando curvas cerradas que a veces precesionan a velocidad constante. Ello se debe a defectos en los altavoces, que, junto con sus lengüetas reflectantes, pese a reproducir la misma frecuencia, no son exactamente iguales. También con sonidos graves aparecen movimientos espurios, producidos por efectos de resonancia en los propios altavoces.

Vamos ahora a los experimentos más científicos. Conectémonos a la vez a dos generadores de frecuencia en línea. El resultado será aún más rico, ya que el reproductor de sonido mezclará ambas fuentes. Por ejemplo, seleccionemos una frecuencia de doscientos hercios en los dos generadores. La imagen permanece estática. Incrementemos ahora la frecuencia en uno solo de los generadores. Ciclo a ciclo, la imagen girará sobre sí misma cada vez a mayor velocidad y, si luego decrecemos, esa misma señal lo hará en sentido contrario.

Y aún podemos dar un paso más: conectaremos cada uno de los dos altavoces a un ordenador distinto, con su propio generador de frecuencias. De esta forma, podremos estudiar combinaciones de dos frecuencias que aportarán, cada una, una amplitud en un solo eje. Puesto que, además, podemos modular independientemente el volumen de cada uno de los dos altavoces, las combinaciones son casi infinitas, el ajuste perfecto y el espectáculo visual, garantizado. IyC

El blog del autor, «Taller y laboratorio 2.0», aloja varios vídeos sobre las bellas imágenes de Lissajous que pueden obtenerse mediante este sencillo montaje experimental.

EN NUESTRO ARCHIVO

Unos dispositivos mecánicos que dibujan armonigramas. C. L. Stong en *IyC*, diciembre de 1976.
Deslumbrantes exhibiciones con láser, en las que se vierte luz sobre luz. Jearl Walker en *IyC*, octubre de 1980.
Herramientas de grafismo informático nos hacen menos ajeno un mundo invisible. A. K. Dewdney en *IyC*, marzo de 1991.

José Manuel Sánchez Ron es miembro de la Real Academia Española y catedrático de historia de la ciencia en el Departamento de Física Teórica de la Universidad Autónoma de Madrid.



HISTORIA DE LA FÍSICA

Las cartas familiares de Heinrich Hertz

El camino a las ondas hertzianas

José Manuel Sánchez Ron

Si Isaac Newton fue afortunado porque logró lo que ya nadie podría en el futuro repetir —ver que lo que une a los planetas y hace caer a los cuerpos hacia la superficie de la Tierra es la misma fuerza, y formular las ecuaciones básicas de la dinámica y de la teoría de la gravitación, aunque siglos después estas se viesen mejoradas gracias a Albert Einstein—, otro tanto se puede decir de James Clerk Maxwell, que desarrolló el conjunto de ecuaciones que rigen el comportamiento de la interacción electromagnética y que hoy denominamos, en su honor, «ecuaciones de Maxwell». Con su teoría del campo electromagnético, o electrodinámica, Maxwell logró, además, unir en un mismo marco teórico la electricidad, el magnetismo y la óptica. Los dos primeros no son sino diferentes manifestaciones de un mismo sustrato físico, electromagnético, como demostró poco menos de medio siglo después con mayor claridad Einstein, al formular la teoría especial de la relatividad. Y los fenómenos ópticos, como la luz, resultaron no ser sino ondas electromagnéticas, algo que advirtió el propio Maxwell.

Sin embargo, los resultados teóricos de Maxwell estaban en su tiempo muy por delante de los conocimientos experimentales. Como él mismo señalaba, restaba por demostrar que los efectos electromagnéticos se transmitían mediante ondas que se propagaban a la velocidad de la luz. Fue un discípulo de Hermann von Helmholtz quien lo consiguió: Heinrich Hertz (1857-1894).

Múnich: de la ingeniería a la ciencia

Tendemos a pensar que los grandes científicos, aquellos que dejaron una huella imborrable, tenían claro desde el principio que a lo que querían dedicarse era a la ciencia, a hacerla avanzar mediante sus investigaciones. Pero no siempre ha sido así. Paul Dirac, por ejemplo, uno de los creadores de la mecánica cuántica, estudió ingeniería eléctrica en Bristol, y se graduó en 1921. Algo similar le ocurrió al protagonista de este artículo.

Hertz llegó a Múnich, en octubre de 1877, para comenzar sus estudios en la Escuela Politécnica. Sin embargo, no tardó mucho en darse cuenta de que no quería ser ingeniero, sino científico. Explicó por qué tomaba esta decisión en una carta que escribió a sus padres el 1 de noviembre de 1877:

Puede que os sorprenda que esta carta siga tan rápidamente a la anterior; no pretendía escribir tan pronto, pero esta vez se trata de un asunto importante que no permite un largo retraso. Es para mí una confesión vergonzosa, pero debo hacerla. Querría cambiar de caballos ahora, en el último momento, y dirigirme a las ciencias de la naturaleza. En este semestre llego a un cruce de caminos donde debo bien dedicarme a ellas completamente o dejarlas y abandonar toda pérdida de tiempo superflua con ellas, si no quiero descuidar mis estudios y convertirme en un ingeniero mediocre. Cuando recientemente me di cuenta de esto, mientras organizaba mi plan de estudios, y, además, sin sombra de duda, mi primer pensamiento fue renunciar a todas las innecesarias preocupaciones sobre las matemáticas y las ciencias de la naturaleza; pero entonces me di cuenta de repente que no podía hacerlo, que hasta entonces solo me había ocupado de estas materias y que únicamente pensaba en ellas —todo lo demás me parecía anticuado— y me di cuenta de esto tan de repente que quería haber saltado y escribiros de inmediato, pero me contuve durante unos pocos días y lo medité. Y no pude llegar a otra conclusión. No puedo comprender por qué no me di cuenta antes, ya que incluso cuando vine aquí era con la mejor intención de estudiar matemáticas y ciencias de la naturaleza y sin pensar en absoluto en agrimensura, construcción de edificios, materiales de construcción, etcétera, que se suponía debían ser mis temas principales. También es una pena que la idea no se me ocurriera mientras estaba en casa, porque entonces podríamos haber hablado de ella y hacer planes mejores que ahora; pero ¿para qué sirve pensar en esto? Ya no puede ayudar. También me he repetido a mí mismo algo que había pensado antes a menudo, que mejor ser un científico importante que un ingeniero importante, aunque sea preferible ser un ingeniero no importante que un científico no importante. Y, ahora que estoy en el borde, creo que lo que dijo Schiller es verdad: «Si no te atreves a arriesgar tu vida, nunca puedes esperar ganar la batalla», y que sería una locura tomar demasiada precaución. No se me escapa el hecho de que convertirme en ingeniero me daría antes una seguridad y lamento que probablemente tendré que depender de vuestra



HEINRICH RUDOLF HERTZ (1857-1894)

ayuda, querido papá, mucho más tiempo que si siguiera el otro camino. Pero todo esto es superado por una cosa: que siento que puedo dedicarme completamente y con entusiasmo a las ciencias de la naturaleza y que estas me harán sentirme realizado, y me doy cuenta ahora de que las que se denominan ciencias de la ingeniería no son suficientes para mí y que constantemente estoy buscando ocupaciones adicionales.

Y, ya casi al final de su carta, anunciaba que:

Veré a los profesores del Politécnico y les pediré que eliminen mi nombre de sus listas (todavía no había completado los trámites de matriculación, así que, al menos, no perderé el dinero de los cursos, que es considerable); me matricularé en la Universidad y veré a los profesores de física de la Universidad o del Politécnico y les pediré consejo acerca de cómo distribuir mi tiempo y qué programa sería mejor que siguiera.

Además de asistir a los cursos habituales en una carrera de física y matemáticas, Hertz se preocupó de estudiar a «los clásicos». «Recientemente», explicaba a su familia en una carta fechada el 4 de febrero de 1878, «he estado a menudo en la sala de lectura, hojeando en los volúmenes del *Acta eruditorum* de Leipzig de 1682, en la que hay una cantidad extraordinaria de materiales interesantes, sobre todo artículos de Leibniz; por ejemplo, los primeros estudios sobre el cálculo diferencial que contienen la propia invención».

Unos días después, el 15 de febrero, insistía en estos intereses: «Recientemente he terminado los cuatro gruesos volúmenes en cuarto de [Jean-Étienne] Montucla [se refiere a la *Histoire des mathematiques* (1758; segunda edición aumentada, 1799-1802)], e incluso me he centrado en las dos primeras partes, que contienen la historia de las matemáticas hasta comienzos del siglo XVIII [...]. En el resto del semestre planeo ocuparme sobre todo de la *Mécanique céleste* de Laplace, además de otros libros más breves. A pesar de la dificultad del tema, esta obra no es particularmente difícil de comprender, debido a la devoción de Laplace a una gran claridad de expresión. Es bastante diferente de lo que esperaba, ya que, desde el principio hasta el final, contiene solo cálculos.»

Estudiante en Berlín

En octubre de 1878, Hertz dejó Múnich para continuar sus estudios en Berlín, aprovechando las posibilidades que ofrecía el sistema universitario germano. El 31 de octubre informaba a la familia de su llegada a la capital prusiana:

Mi curso, esto es, el que imparte Kirchhoff, comienza el lunes; otro no empezará hasta el siguiente miércoles. Además, después de todo me he apuntado para el laboratorio; como uno de los premios de este año cae más o menos en mi campo, intentaré abordarlo. Esta no era mi intención al principio, porque el curso de mineralogía que quería seguir entraba en conflicto con él, pero he decidido dejarlo para el próximo semestre. Ya he hablado sobre esto con el Prof. Helmholtz, que amablemente me ha proporcionado alguna información sobre la bibliografía; creo que también encontraré en el laboratorio lo que necesite.

Hertz lo hizo tan bien en Berlín que el 8 de agosto de 1880 recibía la siguiente carta de Hermann von Helmholtz:

El 1 de octubre, uno de los puestos de ayudante de mi Instituto de Física queda vacante y, por consiguiente, me tomo la libertad de preguntarle si estaría inclinado a asumir el puesto que el Dr. Kayser ha ocupado hasta ahora. Los deberes consisten principalmente en encargarse de la preparación de mis clases y posiblemente también en ayudar con mis propios experimentos, además de ocuparse de la biblioteca; y, si surgiese el caso, sustituir a otros ayudantes. El nombramiento se renueva cada dos años, la remuneración llega a los 1110 marcos anuales en metálico y alojamiento gratuito, lo mismo que calefacción, gas y agua. El puesto en cuestión dejaba al Dr. Kayser mucho tiempo libre, pero naturalmente usted no sería tan libre como si no tuviera un puesto.

Hertz aceptó. ¿Cómo no aprovechar la oportunidad de trabajar con el gran Helmholtz, el científico posiblemente más respetado de Alemania, el hombre que ya había transitado con distinción por los campos de la fisiología, la matemática y la física?

En Kiel y Karlsruhe

Bajo la tutela de Helmholtz, Hertz continuó floreciendo científicamente en Berlín. Tanto, que en 1883 recibió la oferta de comenzar su carrera docente en Kiel en calidad de *privatdozent* (puesto universitario que permitía ofrecer cursos, por los que se recibía una retribución en función de los alumnos que se matriculasen; en general, la universidad no pagaba a este tipo de profesores asociados). Así lo explicaba a su padre el 1 de marzo de 1883:

*Querido papá, te estoy escribiendo un poco antes de lo habitual para pedirte tu consejo en el siguiente asunto. Sabes lo incómodo que me siento por tener que prepararme para la habilitación [trabajo superior a una tesis doctoral, que facultaba para poder enseñar en la universidad] aquí, donde ya hay muchos profesores asociados [*Privatdozenten*], y cuánto deseo un cambio general. El* Geheimrat *[título honorífico muy prestigioso] Kirchhoff vino a verme hace dos días después de su clase y me dijo que se quiere un profesor asociado para física matemática en Kiel [...]. El ministro le ha preguntado a él, y en particular al Prof. Weierstrass, si es posible encontrar una persona adecuada, y han pensado en mí.*

Después de algunas negociaciones, Hertz aceptó presentar su habilitación en Kiel, donde permaneció hasta 1885. Esperaba ser promovido a profesor (catedrático) en Kiel, pero surgió una oferta de Karlsruhe. El 30 de noviembre de 1884 daba a sus padres las primeras noticias de esa posibilidad:

Estaba equivocado respecto a la pregunta del Prof. [Albert] Ladenburg, ya que pensé que se había creado una cátedra aquí; de hecho, un colega de Karlsruhe le había pedido información y le dijo que habían puesto la vista en mí. No sé para qué. De nuevo estoy insatisfecho, porque preferiría tener una seguridad a dos posibilidades y veo el futuro con cristales tan oscuros que subjetivamente estoy convencido de que ninguna de estas ni de

otras posibilidades se cumplirán, y me torturo con estos espectros y monstruos de mi imaginación.

A pesar de sus temores, la oferta de Karlsruhe se concretó. Le llegó el 20 de diciembre. La aceptó y en Karlsruhe (a donde se incorporó en marzo de 1885) llegaría su mayor éxito científico: la demostración de la existencia de las ondas electromagnéticas predichas por Maxwell.

Las ondas electromagnéticas existen

Fue en Karlsruhe donde abordó una cuestión que, como señalaba en una carta que dirigió a Helmholtz el 5 de noviembre de 1887, este le había «urgido investigar hace algunos años y que he tenido en mente desde entonces, pero que hasta ahora no he encontrado forma de estudiarla con algún tipo de éxito inequívoco.» En la carta que envió el 23 de diciembre de 1887 a sus padres, daba algunos detalles de sus esfuerzos:

Para mi gran satisfacción, las vacaciones están aquí y en los dos primeros días, miércoles y jueves, he seguido trabajando vigorosamente. De nuevo tengo mucho material para un artículo, y me gustaría mucho terminarlo. Pero en las últimas cinco semanas no he avanzado. Necesito varias horas de preparación para mis experimentos, y solo los puedo llevar a cabo en mi habitación más grande, el auditorio, donde no se puede hacer nada mientras se estén dando clases. A veces he intentado hacerlos en los sábados libres, pero para cuando tenía todo a punto se había ido el día, y los aparatos que había preparado con tanta dificultad tenían que ser desmontados de nuevo. La cuestión que me ha estado ocupando se refiere a la velocidad de propagación de los efectos eléctricos en el aire. De acuerdo con una importante y bella teoría [la de Maxwell], estos efectos se propagan con una velocidad finita, que es la velocidad de la luz; y yo no he dudado nunca de que esta visión es correcta. Ahora puedo medir incluso una velocidad tan grande. Esto difícilmente habría sido posible con anterioridad. Una vez, hace veinte años, Helmholtz intentó estos experimentos y estableció con gran dificultad que la velocidad de propagación era mayor que 42 millas por segundo. ¡Pero aquí estamos tratando con 42.000 millas! ¿Cuál es el inesperado y, para mí, desagradable resultado de estos experimentos? Que la velocidad no es la de la luz, sino mucho mayor, acaso infinitamente grande, y, en todo caso, no medible. Incluso si fuese tres veces mayor, todavía podría ser medida, pero todo tiene sus límites. Y no se puede argumentar con la naturaleza; debe ser como es. Pero, ciertamente, me habría gustado más obtener un claro resultado positivo y no este negativo. Y las «teorías eléctricas más prometedoras» sobre las que escribí mi último artículo de repente ya no parecen prometedoras. Es verdad que hay que ser cauteloso, pero, de nuevo, los experimentos me parecen demasiado claros.

Pero esa misma tarde comprobó que se había equivocado y que todo funcionaba como había esperado. En su diario anotó:

23 de diciembre de 1887. Experimentos. Obtenida por la tarde una indicación de la velocidad finita de la propagación del efecto de inducción.
26 de diciembre. Experimentos por la tarde y obtención de confirmación de resultados.
28 de diciembre. Experimentado y observado el efecto de las ondas electromagnéticas hasta 14 metros.
29 de diciembre. Experimentos. Efecto de sombra en hojas metálicas, reflexión de la pared, etc.
30 de diciembre. Seguido el efecto a través del auditorio.
31 de diciembre. Cansado de experimentar. Noche en la casa de mis suegros. Recordado el pasado año con placer.

No es sorprendente que esos resultados le permitieran mirar al pasado con alegría. Había hecho historia. El 26 de diciembre escribía a sus padres:

La noche anterior a Nochebuena recibí un gran regalo en mi trabajo, al menos es lo que parece; la naturaleza parece estar algo más amablemente dispuesta hacia mí de lo que parecía antes.

Esos experimentos entrañaban una gran dificultad. Simplificando mucho, lo que hizo fue separar un aparato (el transmisor) que producía el «efecto electromagnético» de un receptor (un espejo reflector formado por una hoja de cinc) tanto como lo permitía la mayor sala de que disponía (el auditorio de su instituto, 14 metros) y comprobar que el efecto electromagnético se propagaba con la misma velocidad que la luz, y que ese efecto eran realmente ondas.

Orgulloso, el 29 de enero de 1888 escribía a sus padres:

Helmholtz ha confirmado ahora que ha recibido mi manuscrito y añade: «Le felicito de todo corazón por este éxito».

Hertz abrió una puerta que no pretendió explorar: la de las aplicaciones técnicas de las ondas electromagnéticas, aplicaciones que, pocos años después de su muerte, desarrollarían sobre todo Guglielmo Marconi y Ferdinand Braun.

Consecuencia de su logro es que en 1889, Hertz cambió Karlsruhe por la más prestigiosa Universidad de Bonn. No pudo, sin embargo, disfrutar mucho allí. En 1892 tuvo que ser operado varias veces debido a una infección que se le manifestó después de varios ataques de migraña.

El 1 de enero de 1894 fallecía de septicemia. Tenía 36 años, pero dejó una huella imborrable en la ciencia. Su gran éxito cambió una parcela esencial para nuestra civilización: la de las comunicaciones. Hoy, cuando la capacidad de informarnos y comunicarnos casi no conoce límites, puede que olvidemos que hace poco menos de siglo y medio no era, en modo alguno, así. La hermandad entre teoría y experimento, ejemplificada en este caso por Maxwell y Hertz, cambiaron ese mundo. Para siempre.

PARA SABER MÁS

Electric waves. Heinrich Hertz. Dover, Nueva York, 1962.
Erinnerungen, Briefe, Tagebücher (Memoirs, Letters, Diaries). Heinrich Hertz. Dirigido por Johana Hertz. Physik Verlag y San Francisco Press, 1977.

EN NUESTRO ARCHIVO

Heinrich Hertz. Manuel García Doncel en *IyC*, enero de 1994.

por Bartolo Luque

Bartolo Luque es físico y profesor de matemáticas en la Universidad Politécnica de Madrid. Sus investigaciones se centran en la teoría de sistemas complejos.



Diagramas de Voronói

De los brotes de cólera a la organización del tejido epitelial

En otoño de 1854, un brote de cólera azotó el distrito del Soho en Londres. En menos de una semana fallecieron unas 700 personas. En aquella época aún se desconocía el mecanismo de transmisión de la enfermedad, y mientras que algunos pensaban que el contagio se producía exclusivamente por contacto con los enfermos, otros culpaban a los vientos que esparcían «miasmas». Pero John Snow, médico inglés que por aquel entonces residía en la zona de Broad Street, tenía otra idea.

Snow tomó un mapa del barrio y marcó con un punto el domicilio de los fallecidos y con una cruz la localización de las bombas de agua potable (*véase la figura 1*). Determinó la distancia entre la residencia de cada difunto y la bomba de agua más cercana, y concluyó que 73 de los 83 casos que había registrado estaban más cerca de la bomba de Broad Street que de ninguna otra. De esta manera, hizo evidente la relación espacial entre las muertes por cólera y dicha fuente. Snow descubrió que su agua estaba contaminada por heces y, tras convencer a las autoridades para que la clausuraran, el brote de cólera declinó.



1. MAPA ELABORADO EN EL SIGLO XIX por el médico John Snow con los domicilios de los fallecidos por el brote de cólera que asoló Londres en 1854 (*puntos*) y las bombas de agua existentes en la zona (*cruces*). Sobre el mapa original se ha superpuesto el diagrama de Voronói asociado a las bombas (*verde*). La mayoría de las muertes por cólera se hallaban en la zona de Voronói asociada a la bomba de Broad Street (*rojo*).

DOMINIO PÚBLICO (*mapa de Londres*)

Aquel «mapa del cólera» convirtió a Snow en uno de los precursores de la epidemiología moderna. Hoy constituye uno de los ejemplos clásicos del uso de métodos geográficos y, probablemente, la primera aplicación científica de los diagramas de Voronói.

Zonas de influencia

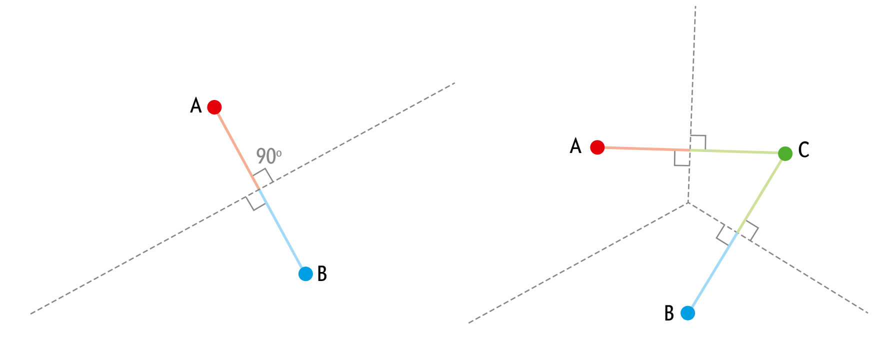
Dado un conjunto cualquiera de puntos en un espacio, a los que denominaremos «puntos generadores», un diagrama de Voronói divide ese espacio asignando una región de influencia a cada uno de ellos de tal manera que todo punto de una zona está más cerca de su generador que de cualquier otro. Por ejemplo, para construir un diagrama de Voronói con los datos de Snow, tomamos como puntos generadores las bombas de agua potable y trazamos las regiones correspondientes alrededor de cada una, estableciendo que un domicilio pertenecerá a dicha región si está más cerca de la fuente en cuestión que de cualquier otra. Queda así patente que la zona asociada a la fuente de Broad Street es, con gran diferencia, la que presenta más fallecidos de todas. Sin saberlo ni dibujarlos expresamente, Snow empleó la idea básica de los diagramas de Voronói antes de su creación o descubrimiento matemático.

Los diagramas de Voronói reciben su nombre del matemático ruso Gueorgui Feodósievich Voronói (1868-1908). Su definición más formal reza así: si tenemos un conjunto de n puntos generadores dado por

$$P = \{p_1, p_2, \ldots, p_n\},$$

el diagrama de Voronói de P se define como la división del espacio en n regiones, una por cada punto generador, de tal modo que un punto q pertenece a la región de influencia de p_i si y solo si la

distancia entre q y p_i es menor que la de q a cualquier otro p_j de P.



2. CONSTRUIR EL DIAGRAMA DE VORONÓI de dos puntos A y B (*izquierda*) es sencillo. Para ello dibujamos el segmento AB que los une y trazamos su mediatriz: la línea perpendicular que divide el segmento justo por la mitad. Los puntos de la mediatriz equidistan de A y de B, por lo que marcan la frontera entre las dos regiones de Voronói correspondientes. Si añadimos un punto más, C (*derecha*), dispondremos de dos nuevos segmentos, AC y BC. Las mediatrices de cada uno de los tres segmentos determinan ahora la frontera entre las respectivas regiones de Voronói.

Los diagramas de Voronói aparecen de manera natural en muchos problemas de distribución espacial y, en general, en sistemas de información geográfica. Por ejemplo, supongamos que Correos desea abrir una nueva oficina postal. Un modelo de asignación de Voronói hará corresponder a cada punto del territorio su oficina postal más cercana, generando así una división de la zona en función del diagrama de Voronói del conjunto de oficinas postales. Este tipo de diagramas ayudan a determinar una buena cobertura hospitalaria para una región, así como a estipular las zonas de control de tráfico aéreo o la distribución óptima de estaciones de bomberos, de metro o de cualquier otro servicio físicamente extendido en el espacio.

Como la idea de Voronói es sencilla y elegante, estos diagramas se han redescubierto múltiples veces a lo largo de la historia y han recibido nombres diversos: teselaciones de Dirichlet, polígonos de Thiessen, zonas de Brillouin o celdas de Wigner-Seitz. Sin embargo, hasta que los ordenadores no se popularizaron, la construcción manual de diagramas de Voronói era ardua y tediosa, lo que limitó su uso práctico (*véase la figura 2*).

Así fue hasta los años setenta del siglo pasado, cuando comenzaron a desarrollarse los primeros algoritmos para su generación bajo el paraguas de una disciplina emergente: la geometría computacional, la rama de las ciencias de la computación que aborda problemas de geometría mediante algoritmos y estructuras de datos. Fueron los matemáticos Michael Ian Shamos y Daniel J. Hoey, pioneros de este campo, quienes presentaron un ingenioso algoritmo para la construcción de diagramas de Voronói y generalizaron el concepto, lo que amplió su uso a campos tan diversos como los sistemas de detección de errores, la meteorología, la medicina, la biología o la modelización digital del terreno, por citar solo unos pocos.

Hoy podemos encontrar multitud de programas en línea que, en un suspiro, nos construyen el diagrama de Voronói de un conjunto cualquiera de puntos. Ello ha propiciado que en Internet podamos encontrar desde originales creaciones artísticas hasta pequeños y curiosos experimentos (*véanse las figuras 3 y 4*) basados en ellos.

Vornonói en la naturaleza

Los diagramas de Voronói aparecen también en numerosas situaciones naturales. Muy a menudo, la razón tiene que ver con fenómenos de crecimiento.

Por ejemplo, si en una placa de Petri «sembramos» varios puntos con bacterias de la misma especie pero de diferentes colores, veremos cómo desde cada punto crece una colonia a un ritmo geométrico constante. Las bacterias de diferentes tonalidades se encontrarán en puntos equidistantes a sus puntos semilla, zona en la que el crecimiento cesará. Al final, la placa de Petri quedará teselada en regiones donde cada punto tendrá el color de la primera bacteria que lo alcanzó. Y puesto que esa bacteria pertenecerá a la colonia del centro generador más cercano, el resultado no será otro que un diagrama de Voronói.

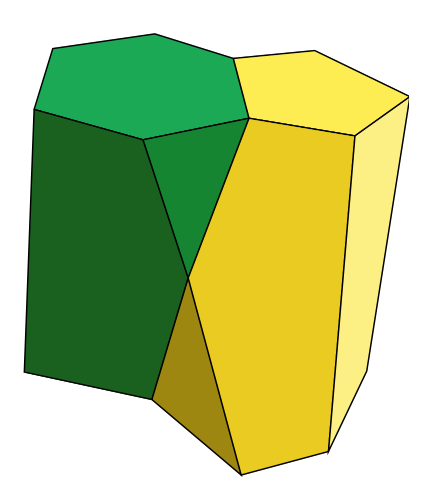
3. EL MUNDO DIVIDIDO en las áreas de Voronói que resultan al tomar las capitales actuales como puntos generadores. Dado que las distancias se calculan sobre la esfera terrestre, estas teselaciones se conocen como diagramas esféricos de Voronói. Según esta división, por ejemplo, Cataluña formaría parte de un país cuya capital sería Andorra la Vella y Sevilla pasaría a ser lusa.

CORTESÍA DE JASON DAVIES (*mapa*)

Si el ritmo de crecimiento depende de la posición de los centros generadores porque se trata de especies bacterianas distintas, podemos «pesar» cada generador multiplicando siempre todas las distancias a él por un determinado factor. Las variantes de estos modelos describen el crecimiento de colonias bacterianas, las características grietas de los suelos secos o los llamativos patrones de los caparazones de las tortugas o el pelaje de las jirafas.

Por supuesto, existen generalizaciones de los diagramas de Voronói. Si nuestros generadores son puntos, el «esqueleto» de Voronói constará de líneas rectas, como hemos visto hasta ahora. Sin embargo, los generadores pueden ser también segmentos, círculos o formas geométricas arbitrarias, en cuyo caso las regiones de Voronói resultarán más complejas (piense, por ejemplo, en qué consistiría el diagrama de Voronói al tomar como generadores un punto y una recta en el plano). Y si los generadores son los objetos presentes en una habitación, las trayectorias seguras para un robot en movimiento ven-

4. SI CALCULAMOS EL DIAGRAMA DE VORONÓI asociado a las capitales de provincia de la España peninsular, sorprende comprobar hasta qué punto las regiones de Voronói correspondientes se asemejan a las provincias actuales. ¿Casualidad? No lo parece. Francisco Javier de Burgos, secretario de Estado de Fomento y responsable de la división administrativa de 1833, pretendía que, en cada provincia, los lugares más alejados de la capital estuvieran, a lo sumo, a un día de viaje de esta.



5. UN TRABAJO RECIENTE dirigido por Luis Escudero, de la Universidad de Sevilla, se ha basado en la construcción de diagramas de Voronói para determinar la geometría de las células epiteliales. Al contrario de lo que se pensaba hasta ahora, dichas células no serían prismas, sino que vendrían dadas por una nueva forma geométrica bautizada como «escutoide». Esta figura muestra dos de ellos.

drán dadas justamente por las fronteras entre las regiones de Voronói.

Escutoides

Los diagramas de Voronói siguen dando sorpresas. Me gustaría acabar mencionando el trabajo reciente de un equipo de matemáticos y biólogos de la Universidad de Sevilla liderados por Luis M. Escudero junto con el físico de sistemas complejos Javier Buceta, de la Universidad de Lehigh. Su resultado acabó desbancando la idea tradicional de que las células epiteliales son prismas. En su lugar, los investigadores hallaron que dichas células exhiben una forma geométrica nueva, a la que bautizaron como «escutoide», la cual minimiza la energía necesaria para mantener al tejido.

Para crear un modelo del tejido epitelial, los investigadores parten de un conjunto de puntos escogidos al azar y construyen su diagrama de Voronói. Calculan entonces el centro de masas de cada región de influencia y utilizan esos nuevos puntos como generadores de un nuevo diagrama de Voronói. Tras repetir el proceso un cierto número de veces, se alcanza la modelización de un tejido sano. Los científicos esperan que la comparación de este tejido ideal con uno real pueda servir como indicador temprano de la presencia de un proceso tumoral. No me digan que no es sorprendente.

PARA SABER MÁS

Computational geometry. Algorithms and applications. Mark de Berg et al. Springer, 2008.

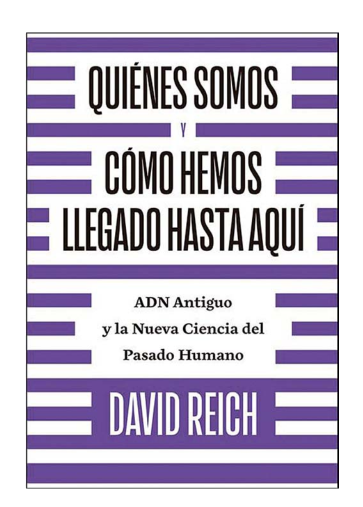
Scutoids are a geometrical solution to three-dimensional packing of epithelia. Pedro Gómez-Gálvez et al. en *Nature Communications*, vol. 9, art. n.º 2960, julio de 2018.

EN NUESTRO ARCHIVO

Relaciones bien cimentadas. Ian Stewart en *IyC*, agosto de 1998.

Así se reparten los átomos en el espacio. Norbert Treitz en *IyC*, septiembre de 2010.

GETTY IMAGES/RAINER LESNIEWSKI/ISTOCK (*mapa*); DE: «SCUTOIDS ARE A GEOMETRICAL SOLUTION TO THREE-DIMENSIONAL PACKING OF EPITHELIA», PEDRO GÓMEZ-GÁLVEZ ET AL. EN *NATURE COMMUNICATIONS*, VOL. 9, ART. N.º 2960, JULIO DE 2018 (*escutoides*).



QUIÉNES SOMOS Y CÓMO HEMOS LLEGADO HASTA AQUÍ
ADN ANTIGUO Y LA NUEVA CIENCIA DEL PASADO HUMANO
David Reich
Antoni Bosch Editor, 2019

Genética antigua

Un nuevo camino para desentrañar el pasado de la humanidad

Nos encontramos ante un libro comprensible para cualquier lector, incluso para aquellos no tengan ningún conocimiento de genética. La mayor parte de la obra constituye un relato fascinante y vertiginoso de la vida científica del autor desde 2007, cuando se unió al equipo que en 2012 demostró que hubo apareamientos entre neandertales y humanos modernos no africanos hace unos 50.000 años. Este sorprendente descubrimiento se consiguió en Alemania, en el laboratorio de Svante Pääbo, inventor de las técnicas necesarias para secuenciar genomas antiguos completos. Después, David Reich ha logrado numerosos descubrimientos en su propio laboratorio en Estados Unidos, aplicando esas mismas técnicas a otras poblaciones antiguas.

En 2009, el grupo del autor detectó con sorpresa que, en la actualidad, los europeos del norte están más emparentados con los nativos americanos que con los siberianos. Para explicarlo, los investigadores propusieron que parte de una hipotética población del norte de Eurasia migró hacia el este (América) y otra hacia el oeste (Europa). También supusieron que esa hipotética población ancestral fue reemplazada posteriormente por otras. Dicha propuesta se confirmó cuando, en 2013, otro grupo publicó datos del genoma completo de un niño que vivió en Siberia hace unos 24.000 años y que presentaba mucha mayor afinidad genética con los europeos y nativos americanos actuales que con los siberianos de hoy en día. Reich considera que este constituye el mejor ejemplo del potencial del ADN antiguo para estudiar la prehistoria.

Mediante la detección de grandes cambios en los genomas antiguos a lo largo del tiempo, el grupo de Reich demostró en 2016 que hubo enormes migraciones de cazadores-recolectores, como la que difundió las herramientas gravetienses por la mayoría de Europa desde su extremo más oriental (hace entre 33.000 y 22.000 años), la que llevó la cultura magdaleniense desde Iberia hasta Francia y Alemania (hace entre 19.000 y 14.000 años) y la de quienes se expandieron por Europa desde el sudeste a partir de un calentamiento postglacial (hace unos 14.000 años).

En 2015, el equipo de Reich demostró, gracias al análisis de genomas antiguos completos, la existencia de una migración masiva de pastores que hace unos 5000 años hacían uso de la rueda y que se expandieron desde la estepa (al norte de los mares Negro y Caspio), dando lugar en Europa a la llamada cultura de la cerámica cordada. Este se convertiría en un trabajo muy influyente, pues apoya una teoría según la cual dicha migración difundió las lenguas indoeuropeas. Y aunque Reich no parece mencionarlo, es importante señalar que, ya en 1993, el genetista italiano Luigi Luca Cavalli-Sforza y sus colaboradores habían publicado en *Science* un mapa que, a partir de la genética de las poblaciones modernas, emplearon para sugerir precisamente la existencia de un gran impacto genético de esta difusión de hablantes indoeuropeos desde la estepa hace unos 5000 años [*véase* «Genes, pueblos y lenguas», por Luigi Luca Cavalli-Sforza; Investigación y Ciencia, enero de 1992].

Otra expansión que comenzó hace unos 4700 años fue la de la cultura del vaso campaniforme desde Iberia. Se desconocía si fue básicamente démica (debida a la dispersión de poblaciones) o cultural (causada por la difusión de la cultura por imitación, pero sin apenas movimiento de poblaciones). El grupo de Reich resolvió esta controversia en 2017, al concluir que se trató de una expansión cultural hasta Europa central (porque no fue acompañada de cambios genéticos relevantes) pero démica en las islas británicas (donde sí se introdujo una nueva componente genética). El libro de Reich resume también resultados similares para otros continentes, para los que todavía no se dispone de tantos datos genéticos antiguos, así como las aportaciones de la genómica a cuestiones como las relativas a la desigualdad, la raza o la identidad.

Con todo, la obra contiene algunas afirmaciones sorprendentes. Por ejemplo, en la introducción se nos dice que Cavalli-Sforza hizo pocas aportaciones nuevas y casi todas erróneas. Sin embargo, y aunque en la época de Cavalli-Sforza aún no había datos de ADN antiguo, fue él el primero en predecir la importancia de procesos clave como la difusión démica y la deriva genética (la influencia del azar en poblaciones de pocos individuos). Sus méritos incluyen muchas otras aportaciones, todas ellas totalmente correctas [*véase* «Luigi Luca Cavalli-Sforza: simbiosis de ciencia y humanidades», por Joaquim Fort; Investigación y Ciencia, octubre de 2018].

Para evitar confusiones, es importante hacer constar que, en la introducción, Reich afirma que Cavalli-Sforza denominó «difusión démica» a la combinación de la dispersión y la mezcla de poblaciones. Esto no es así, puesto que Cavalli-Sforza siempre definió la difusión démica como la dispersión de poblaciones, excluyendo la mezcla. Y predijo que la combinación de ambos procesos, dispersión y mezcla, daría lugar a variaciones espaciales de frecuencias genéticas, las cuales fueron detectadas posteriormente por él y sus colaboradores (*Science*, 1978).

También sorprende que Reich escriba que fueron él y su grupo quienes, en 2016, «descubrieron» que la agricultura (esto es, el Neolítico) se difundió desde Oriente Próximo en todas direcciones debido a una dispersión de poblaciones de agricultores que comenzó hace unos 9000 años. Una vez más, Cavalli-Sforza y su equipo ya habían llegado a esta conclusión para el caso de Europa comparando mapas genéticos actuales, primero con un mapa de dataciones neo-

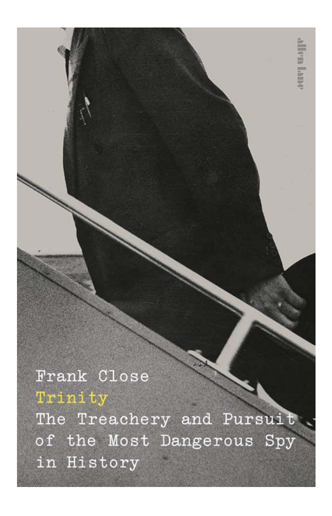
líticas (*Science*, 1978) y después con uno de simulaciones genéticas (*American Naturalist*, 1986).

Es cierto que, tal y como explica Reich, los mapas de variaciones genéticas han sido mejorados gracias a los datos aportados por el ADN antiguo y que se han desarrollado otros tipos de simulaciones. No obstante, nada de ello invalida la conclusión de que hubo dispersión de poblaciones neolíticas. Es más, dicha conclusión ya había sido confirmada mediante técnicas de genética antigua con anterioridad a los trabajos de Reich. Tal y como se comenta en el capítulo 5 de la obra, ya en 2009 el grupo de Joachim Burger había publicado en *Science* el descubrimiento de que los cazadores-recolectores de Europa central presentaban haplogrupos muy diferentes de los de los primeros agricultores (los haplogrupos hacen referencia a pequeñas porciones del genoma, mientras que Reich y sus colaboradores estudian el genoma completo). Es verdad que hasta 2016 no se consiguieron genomas completos de Oriente Próximo. Pero la dispersión de poblaciones neolíticas en Europa estaba ya demostrada, y la introducción del libro parece transmitir la impresión contraria.

Igualmente problemática resulta la afirmación, también en el capítulo 5, de que Cavalli-Sforza defendía que los primeros agricultores que llegaron a Europa se mezclaron sustancialmente con los cazadores-recolectores. En realidad, Cavalli-Sforza insistió en que no era posible llegar a esta conclusión con los datos disponibles (un texto que no deja lugar a dudas es «Demic diffusion as the basic process of human expansions», en *Examining the farming/language hypothesis*, dirigido por Peter Bellwood y Colin Renfrew y publicado en 2002 por el Instituto McDonald de Investigación Arqueológica de la Universidad de Cambridge). De hecho, Cavalli-Sforza defendía la teoría contraria: que el Neolítico se propagó básicamente por la dispersión de poblaciones de agricultores, y solo en menor medida por su mezcla con cazadores-recolectores. El investigador había llegado a esta idea por dos razones: la fuerte resistencia de los pigmeos a integrarse en poblaciones de agricultores que había observado durante sus expediciones a África, y su demostración de que el modelo matemático elaborado en su día por Ronald Fisher (que es totalmente démico) explicaba por qué el Neolítico se había propagado por Europa a la velocidad que indican las pruebas arqueológicas [*véase* «Modelos matemáticos de la transición neolítica», por Joaquim Fort; Investigación y Ciencia, julio de 2015].

Por lo demás, la traducción del libro de Reich es muy buena, si bien una revisión por parte de un experto habría permitido corregir algunos errores (por ejemplo, cuando en el primer capítulo se afirma que los neandertales se extinguieron antes de la llegada de los humanos modernos). Esta es probablemente la única obra escrita por un experto en ADN antiguo en activo que expone los enormes logros que esta disciplina ha conseguido durante los últimos años, muchos de ellos fruto del trabajo del autor y su grupo. Su lectura resulta imprescindible para todos aquellos interesados en el tema.

—Joaquim Fort
Universidad de Gerona
Institución Catalana de Investigación y Estudios Avanzados (ICREA)



TRINITY
THE TREACHERY AND PURSUIT OF THE MOST DANGEROUS SPY IN HISTORY
Frank Close
Allen Lane, 2019

Klaus Fuchs, el físico que contaba demasiado

La insólita biografía del «espía más peligroso de la historia» ilumina algunos aspectos poco conocidos del desarrollo de la primera bomba atómica

El desarrollo de las primeras armas nucleares constituye un capítulo perturbadoramente fascinante de la historia de la ciencia. La razón excede la mera implicación de los científicos en la investigación militar, de la cual contamos con repetidos ejemplos a lo largo de la historia: Arquímedes puso sus conocimientos al servicio de la defensa de Siracusa, Galileo Galilei impartió lecciones en Padua sobre el diseño de fortificaciones, y Fritz Haber ideó las primeras armas químicas usadas en la Gran Guerra. Antes bien, el programa nuclear angloamericano sobresale por otras causas.

Una es el inmenso reto científico que supuso aplicar la naciente física nuclear al desarrollo de un explosivo sin precedentes. Desde el punto de vista organizativo, la estructura del Proyecto Manhattan sienta un claro precedente de lo que hoy llamamos «gran ciencia». Pero, además, las motivaciones de algunos de los científicos e ingenieros que participaron en él estuvieron a veces plagadas de ambigüedades, contradicciones y lealtades divididas. Para el observador actual, gran parte de estas historias personales quedan ocultas tras las grandes narrativas del proyecto, así como por las masacres de Hiroshima y Nagasaki a las que condujo.

Frank Close nos ofrece en *Trinity* una oportunidad de asomarnos a este último aspecto de la historia a través de la biografía de Klaus Fuchs (1911-1988), el físico cuya exitosa carrera como agente soviético hizo que el Congreso de EE.UU. le considerara «el espía más peligroso de la historia», tal y como nos recuerda el subtítulo de la obra.

El libro nos guía a través de las vicisitudes de juventud del protagonista, su militancia comunista, la huida de la Alemania nazi y su llegada como refugiado político al Reino Unido. Allí Fuchs continúa su formación como físico, primero en la Universidad de Bristol y luego en la de Edimburgo, en la que trabaja con Max Born. Tras el paréntesis de su internamiento en Canadá como «extranjero enemigo», se incorpora a la Universidad de Birmingham en el grupo de Rudolf Peierls, otro exiliado alemán que jugó un

papel crucial en los inicios del programa nuclear aliado.

Gracias a Peierls, en cuya familia llegó a integrarse como un miembro más, Fuchs comienza en 1941 a trabajar en Tube Alloys, nombre clave del proyecto nuclear del Reino Unido. En 1944, como parte de la expedición científica británica, pasa al laboratorio de Los Álamos, en EE.UU., donde forma parte del equipo que diseña y construye la primera bomba atómica, detonada el 16 de julio de 1945 en Alamogordo, así como las usadas contra Japón el 6 y el 9 agosto de ese mismo año. Tras el final de la guerra continúa un año más en Los Álamos trabajando en los primeros diseños de la bomba de hidrógeno, para regresar en 1946 al Reino Unido como director de la división de física teórica del Laboratorio de Harwell, sede del programa nuclear británico.

Estas parecerían las peripecias vitales de un científico nuclear más si no fuera porque, entre 1941 y 1950, Fuchs fue una de las principales fuentes de información de la Unión Soviética sobre los progresos del proyecto nuclear angloamericano. En concreto, desde su privilegiada posición como uno de los científicos clave del Proyecto Manhattan, Fuchs transmitió detalles cruciales tanto sobre la bomba de implosión de plutonio, el tipo de arma detonado primero en Alamogordo y luego sobre Nagasaki, como sobre las investigaciones iniciales en la bomba de hidrógeno. Esta información fue importante para que los soviéticos pudieran probar su primera bomba de plutonio ya en agosto de 1949, lo que inauguraría una carrera armamentística de cuatro décadas. Puede decirse, pues, que Fuchs contribuyó indirectamente a establecer un equilibrio militar que, a través de la doctrina de la destrucción mutua asegurada, evitó una guerra nuclear entre las dos superpotencias.

Resulta tentador interpretar a Fuchs como resultado exclusivo de la situación política del momento. El ascenso de los fascismos durante el periodo de entreguerras, junto a los efectos sociales de la depresión económica que siguió al crac de 1929, había llevado a una parte importante de la intelectualidad europea y norteamericana a situarse políticamente en posiciones izquierdistas, desde la socialdemocracia o el *New Deal* al comunismo estalinista. Eran muchos también los que, no profesando una ideología comunista, veían con interés o simpatía el «experimento soviético». Este se percibía, a pesar de sus «excesos», como un intento de crear una sociedad basada en principios más justos que los que habían conducido a la debacle social y política que vivía Occidente. De hecho, a lo largo de la década de 1930, la distinción entre comunismo y antifascismo se fue desdibujando progresivamente. A eso contribuyó notablemente el apoyo militar soviético a la República Española durante la guerra civil, en contraste con la pasividad de las democracias occidentales.

Si bien el pacto de no agresión germano-soviético de 1939 —que dio a Hitler la seguridad en su flanco oriental para iniciar la Segunda Guerra Mundial— le alienó simpatías, la invasión alemana en junio de 1941 devolvió a la Unión Soviética los apoyos incluso en círculos liberales. Ahora se trataba no solo de un aliado en la lucha contra el nazismo, sino de aquel que mayor coste humano estaba asumiendo. No resulta sorprendente, pues, que algunos participantes del programa nuclear angloamericano se preguntasen por qué, en esas circunstancias, el aliado soviético tenía que verse privado del fruto de sus esfuerzos.

Aunque esto explica parte de los motivos de Fuchs, Close nos demuestra que su personalidad tenía muchas más facetas. Sin duda, hay en él un honesto compromiso político y un sólido imperativo ético, inculcado por su padre clérigo, de «hacer lo correcto a toda costa». Pero también un grado de duplicidad propia del más avezado espía profesional. Solo tras su detención en 1950 pareció ser consciente de hasta qué punto había traicionado la confianza de las personas de su entorno, y muy en particular del matrimonio Peierls. Las repercusiones de la confesión de Fuchs alcanzaron además a algunos de sus colegas científicos, Peierls entre ellos, que en el paranoico clima político imperante se encontraron bajo sospecha de espionaje. Recordemos también que, solo meses después de ser detenido Fuchs, su colega de Harwell Bruno Pontecorvo llevó a cabo una súbita y rocambolesca deserción a la Unión Soviética aprovechando unas vacaciones en Italia.

Trinity es el resultado de una exhaustiva e impresionante labor de investigación histórica que hace uso, entre otras fuentes, de documentos desclasificados, incluida la transcripción de grabaciones y escuchas telefónicas. La obra no se limita a ser una mera narración de hechos, sino que intenta descifrar la compleja personalidad del biografiado. De hecho, la investigación de Close tiene como objetivo clarificar dos puntos clave de la biografía de Fuchs.

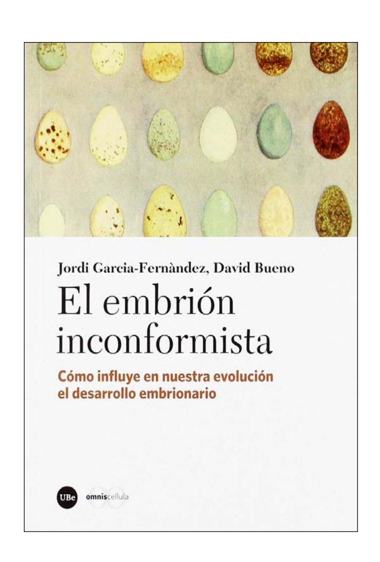
El primero son las razones de su confesión ante los interrogadores del MI5, el servicio de inteligencia británico. Las pruebas contra él eran muy débiles y su procesamiento hubiera sido muy difícil si hubiera negado las acusaciones. Esto quedó demostrado poco después en el caso de Ted Hall, el otro gran informador de los soviéticos en Los Álamos.

El segundo se refiere al inicio de la actividad como espía de Fuchs. De haberse producido esta antes de finales de junio de 1941, su argumentación basada en que compartía información con los aliados de Gran Bretaña quedaría invalidada. En esos momentos, la Unión Soviética estaba todavía ligada a la Alemania nazi por el pacto de no agresión y, como tal, no se la podía considerar una potencia amiga de los británicos.

El libro revela además la manera en que el éxito de Fuchs como espía no se debió tan solo a la astucia de este, sino también a la desidia —cuando no a la incompetencia— de los servicios de seguridad británicos. Finalmente, el libro nos muestra el lado trágico de Klaus Fuchs. Aun después de cumplir su condena de cárcel y emigrar a la Alemania Oriental, la Unión Soviética se negó a reconocer públicamente su deuda con él, ya que hacerlo hubiera dejado en mal lugar a la ciencia soviética.

A pesar de todo lo anterior, hay que advertir que *Trinity* no es una «historia de espías». Su lectura puede resultar difícil en ocasiones: es el caso de los capítulos centrales dedicados a la «caza de Fuchs», donde Close disecciona día a día, y a veces hora a hora, los movimientos de Fuchs, sus asociados y los agentes del MI5. Estamos ante una obra eminentemente histórica, no exenta de cierto toque académico, que continúa la línea de libros anteriores del autor como *The infinity puzzle* (una historia del desarrollo del modelo estándar de la física de partículas) y *Half-life* (la biografía del físico nuclear Bruno Pontecorvo). Pero el Frank Close divulgador también se deja ver aquí, como cuando explica magistralmente la física necesaria para entender el trabajo científico de los diversos personajes que desfilan por las páginas del libro. Todo ello hace de *Trinity* una obra sin duda interesante y accesible para un amplio espectro de lectores.

—Miguel Á. Vázquez-Mozo
Departamento de Física Fundamental
Universidad de Salamanca



EL EMBRIÓN INCONFORMISTA
CÓMO INFLUYE EN NUESTRA EVOLUCIÓN EL DESARROLLO EMBRIONARIO
Jordi Garcia-Fernàndez y David Bueno
Universitat de Barcelona Edicions, 2019

La evolución del desarrollo embrionario como motor de la diversidad animal

Una introducción tan accesible como rigurosa a una de las grandes preguntas de la biología evolutiva

Todos somos parientes. La evolución biológica nos muestra que todos los seres vivos tenemos un lejano antepasado común del que procedemos. Todos. Parece algo sobrenatural, pero no lo es. Ello se debe a dos fenómenos fundamentales: la variabilidad intrínseca de los seres vivos y el mecanismo de selección natural que preserva y hace prosperar aquellas variantes más aptas para reproducirse y dar, a su vez, nuevas generaciones de esas variantes. Un mecanismo inexorable que impulsa la evolución y que fue descubierto de manera independiente por dos geniales pensadores, Charles Darwin y Alfred Wallace.

La integración de la teoría de la evolución por selección natural y de la teoría genética de Gregor Mendel daría lugar a la llamada «síntesis moderna». Esta aportó conceptos tan esenciales como el de herencia genética, el de mutación aleatoria como fuente de variación y el de genética de poblaciones. Y en particular, llegó a la noción del gen como unidad básica de la evolución, algo que no estuvo al alcance de Darwin y Wallace ya que no conocieron las aportaciones de Mendel. Darwin ya había explicado que todo pequeño paso en la historia evolutiva nace de un cambio azaroso que triunfa. El afortunado título del libro *El azar y la necesidad*, publicado por Jacques Monod en 1970, cinco años después de recibir el premio Nobel de fisiología o medicina, lo resume a la vez de manera científica y lírica.

Tenemos, pues, la unidad básica de la evolución (los genes) y los mecanismos que la regulan (la selección natural). Pero una pregunta sigue en el aire. Si consideramos solo los animales, veremos que están divididos en 35 filos o grandes grupos, cada uno de ellos caracterizado por su plan corporal. Algunos son ampliamente conocidos, como los cordados, que incluyen los vertebrados y nuestra especie; los equinodermos, compuestos mayormente por erizos y estrellas de mar; los artrópodos, como insectos y crustáceos; o los moluscos, que reúnen todo tipo de almejas, ostras, pulpos y calamares, babosas y caracoles. Pero por otro lado, si consideramos los genomas de las especies de cada filo, veremos que guardan mucho en común; es decir, raramente hay genes específicos de cada filo. Ello conduce a una pregunta natural: ¿cómo es posible que, a partir de un conjunto limitado de genes, haya podido surgir esa espectacular diversidad animal, que va desde ostras y calamares hasta gacelas y humanos, pasando por cucarachas y estrellas de mar?

En esencia, la respuesta está en la versatilidad de los genes, cuya regulación puede ofrecer múltiples posibilidades y cuya expresión puede dar lugar a más de una proteína, y en las diferentes combinaciones que pueden adoptar las proteínas para ejecutar funciones de todo tipo. El conjunto constituye una poderosa caja de herramientas con la que puede construirse cualquiera de los animales que conocemos y cuya acción se ejecuta en el embrión, el estadio en el que se producen los procesos de desarrollo que darán lugar al plan corporal del organismo.

Así pues, la evolución opera fundamentalmente en los genes, y estos son esenciales para el desarrollo. De ahí el eje evolución y desarrollo, *evo-devo* para los amigos, una joven disciplina que estudia la biología evolutiva del desarrollo y que aborda dos grandes preguntas: ¿cómo ha afectado el desarrollo a la evolución morfológica? y ¿cómo ha evolucionado el propio desarrollo? Desde el punto de vista de la evo-devo, la evolución se contemplaría como el cambio en los procesos de desarrollo [*véase* «Desarrollo embrionario y evolución», por Katherine E. Willmore; Investigación y Ciencia, septiembre de 2010].

De todo ello trata *El embrión inconformista*, en particular de la caja de herramientas. Una caja de herramientas ciertamente versátil pero que tiene también sus limitaciones, por lo que no resulta sorprendente que haya resuelto algunos problemas evolutivos con un cierto componente de chapuza. Lo explicaba François Jacob, colega de Monod que compartió con él el premio Nobel en 1965, en su ensayo de 1977 *Evolution and tinkering*, que podría traducirse como «Evolución y bricolaje». Es decir, que la evolución trabaja con la caja de herramientas disponible y no inventa genes nuevos *ad hoc* para desarrollar nuevas funciones.

Esas restricciones se hacen patentes al observar algunas soluciones evolutivas deficientes que hallamos en el mundo animal. En *El embrión inconformista* se detallan algunas de ellas, referidas a la especie humana. Por ejemplo, los ligamentos de nuestras rodillas son asimétricos, lo cual propicia lesiones, como vemos a menudo en los futbolistas. Esa organización de los ligamentos es una buena solución para los cuadrúpedos, pero ya no lo es tanto para quienes hemos devenido bípedos, sobre todo si hemos incrementado nuestro peso. En el mundo animal observamos numerosos ejemplos de soluciones deficientes. Por ejemplo, las que causan que la retina esté invertida o que tenga un punto ciego, o las que han generado estructuras inútiles, como las inservibles patas anteriores del tiranosaurio, o las alas que no vuelan de los avestruces y que la evolución no ha podido eliminar del todo.

¿Recuerdan el caso del Apolo 13, cuando, en su viaje a la Luna en abril de 1970, fallaron los filtros del aire y pusieron en riesgo la vida de la tripulación? Al final, con los materiales disponibles en la nave, los astronautas lograron improvisar un tosco filtro con una bolsa de plástico, una caja de cartón, cinta aislante y un calcetín. La evolución a veces opera de ese modo: soluciona problemas como puede reciclando materiales.

Esas soluciones imperfectas nos muestran el sinsentido de las ideas creacionis-

tas, que propugnan que unas estructuras tan complejas como un ser vivo, o el ojo de un ser vivo, solo pueden haber sido concebidas por un diseñador sobrenatural. Es el viejo argumento de William Paley, que en el siglo XVIII pretendía demostrar la existencia de Dios con la metáfora del relojero: que no puede existir algo tan complicado como un reloj (o un ojo humano) sin la existencia de un relojero (o un diseñador superior, Dios). En 1986, el incisivo evolucionista Richard Dawkins daría las respuestas pertinentes en su obra *El relojero ciego*. No tiene sentido hablar de creacionismo, o de la astuta versión moderna del diseño inteligente, a la vista —entre otras cosas— de los torpes diseños que en ocasiones vemos en el mundo vivo.

El embrión inconformista pone todas estas cuestiones al alcance del público. En una primera parte, centrada en conceptos básicos, describe qué es el ADN y cómo se organiza; cómo se estructura el genoma; cómo se producen las proteínas, los bloques elementales a partir de los cuales se construye el animal, a partir de los genes; y en fin, cómo se desarrolla un embrión. Todo ello en un lenguaje claro y accesible, con el uso frecuente de metáforas pero sin perder ni un ápice de rigor. No es un ejercicio fácil, pues a mendo hay que entrar en cuestiones que entrañan cierta complejidad. Pongamos por caso la división de los genes en intrones (que no codifican proteínas) y exones (que sí lo hacen). El libro explica cómo un proceso de corta y pega hace que se reúnan todos los exones y pueda generarse la proteína completa. Y cómo la existencia de exones e intrones posibilita que un gen produzca varias proteínas diferentes gracias al fenómeno del corta y pega alternativo.

La segunda parte de la obra nos ofrece ejemplos concretos. Ilustra cómo han podido generarse serpientes sin patas, o murciélagos con las extremidades anteriores transformadas en alas, gracias a la mencionada caja de herramientas. O cómo se ha formado el pico de los pájaros a partir de unas mandíbulas ordinarias, o los picos tan diferentes de las distintas especies de pinzones de las islas Galápagos que Darwin hizo famosos. Cabe añadir que Jordi Garcia-Fernàndez y David Bueno han protagonizado varios de los ejemplos comentados. No cabe duda de que esa experiencia de primera mano ha sido fundamental para que las explicaciones sean tan didácticas como rigurosas: perfectamente comprensibles para un espectro muy amplio de lectores que se pregunten cómo, a partir de un número relativamente limitado de genes, ha podido surgir esa maravillosa biodiversidad que observamos en la naturaleza.

—Xavier Bellés
Instituto de Biología Evolutiva
CSIC y Universidad Pompeu Fabra

NOVEDADES

Una selección de los editores de *Investigación y Ciencia*



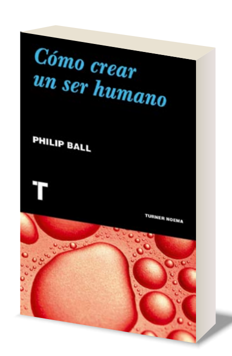
SAQUE LA LENGUA
MEDICINA EN ESPAÑOL IV: DUDAS Y CURIOSIDADES VARIAS DEL LENGUAJE MÉDICO
Fernando A. Navarro
Ediciones Cálamo, 2019
ISBN: 978-84-16742-15-8
344 págs. (23,50 €)



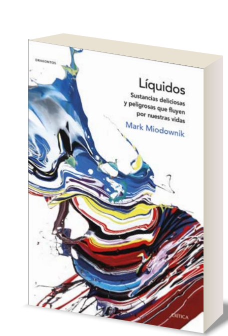
MÁS ALLÁ DEL BIG BANG
UN BREVE RECORRIDO POR LA HISTORIA DEL UNIVERSO
Iván Agulló
Debate, 2020
ISBN: 9788417636647
112 págs. (13,90 €)



CÓMO CREAR UN SER HUMANO
Philip Ball
Turner, 2020
ISBN: 978-84-17866-06-8
376 págs. (24,90 €)

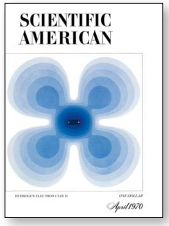


LÍQUIDOS
SUSTANCIAS DELICIOSAS Y PELIGROSAS QUE FLUYEN POR NUESTRAS VIDAS
Mark Miodownik
Crítica, 2020
ISBN: 978-84-9199-181-6
256 págs. (21,90 €)



Recopilación de Daniel C. Schlenoff

ABRIL



1970



1920



1870

1970

A favor del ambiente

«En su reciente discurso al Congreso acerca del medioambiente, el presidente Nixon enumeró 37 medidas que ahora podemos tomar para avanzar espectacularmente hacia lo que se ha convertido en un objetivo común y urgente para todos los estadounidenses: la recuperación de nuestro hábitat natural como un lugar a la vez habitable y acogedor para las personas. Esas medidas se han concebido para conseguir progresar en cuatro áreas fundamentales: el control de la contaminación del agua, el control de la polución del aire, la gestión de los residuos sólidos y la creación de nuevas zonas de recreo y espacios abiertos. Una de las medidas de la Administración fue crear un Consejo de Calidad Ambiental, formado por tres miembros, que velará por nuestra conciencia medioambiental y será objetivo de nuestro ingenio.»

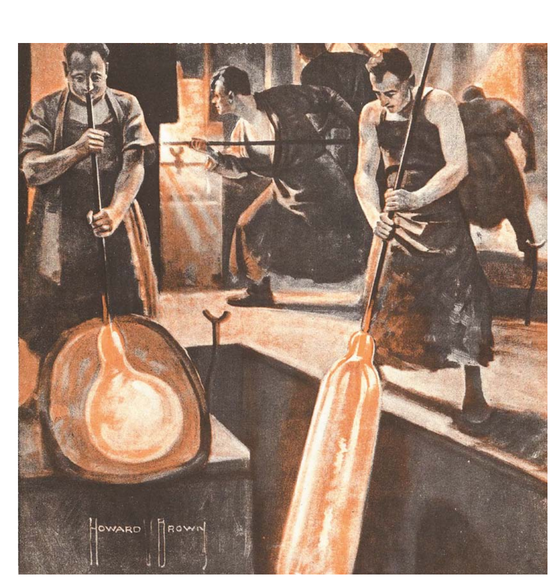
Pantallas de cristal líquido

«En años recientes, los cristales líquidos han estimulado la imaginación de los ingenieros. Esas sustancias se están empleando actualmente para crear una nueva familia de dispositivos para la representación de símbolos, como números y letras. También pueden posibilitar el diseño de una ventana que pueda hacerse opaca o transparente sin más que pulsar un conmutador, y de un televisor no más grueso que el marco de un grabado. Algún día, los cristales líquidos podrían convertirse en el elemento generador de imagen del más ubicuo de todos los aparatos de visualización: el receptor de televisión.
George H. Heilmeier.»

1920

Fabricando cristales

«Se ve en nuestra imagen una escena típica en una fábrica de cristales de ventana ordinarios. Se trata de un sector de la industria que hoy es de un interés más que ordinario en los países no teutónicos de Europa, en virtud de los esfuerzos que realizan para fomentar la producción nacional y así romper el monopolio alemán que existía antes de la Primera Guerra Mundial. Quizá no sea generalmente sabido que la formación de una delgada lámina de vidrio requiere que el glaseador se atenga a la alambicada fórmula de soplar el vidrio en cilindros para luego hendirlos y aplanarlos y obtener así las hojas, pero esa es la realidad.»



1920: Soplar el vidrio en forma de cilindros para hacer cristales de ventana es un método antiguo, pero aún es el mejor.

SCIENTIFIC AMERICAN, VOL. CXXII, N.º 15, 10 DE ABRIL DE 1920

Nuevos usos de la aguja de tatuar

«Al pensar en una operación de tatuaje, solemos imaginarnos un establecimiento de reputación más o menos dudosa en el Bowery o en Barbary Coast, donde fornidos soldados y duros marineros acuden a que les inserten coloridos dibujos en los pocos centímetros cuadrados de la epidermis que aún muestra su color original. Pero la pequeña aguja se usa hoy para otras cosas que delinear rosados cupidos y azules anclas sobre pechos viriles y antebrazos musculosos. La próxima vez que vean a una linda joven cuyo cutis permanezca bella e inalterablemente sonrosado, pese a cualquier estímulo para ruborizarse o palidecer, procuren averiguar si ha sido cliente de algún tatuador que, por el adecuado estipendio, le haya introducido bajo la piel el tono justamente correcto de suave arrebol.

Pero el tatuador avispado no agota sus posibilidades embelleciendo mejillas femeninas. En la manga guarda otra carta del mismo valor. El retocador de fotos que elimina lo que no agrada al sujeto y añade hoyuelos y demás, que al sujeto le gustaría creer que están ahí, se encuentra con que trabajando a mano su mejor velocidad es de unos seis negativos al día. Pero con el veloz repiqueteo de la aguja eléctrica puede duplicar o triplicar su rendimiento. Así pues, si a su tatuador favorito lo hallase ocupado con afán en el tatuaje de un retrato, no dude de su salud mental. Simplemente está complementando honradamente sus ganancias.»

1870

La desaparición de una especie

«La gran alca, en tiempos muy abundante en ambas orillas del Atlántico Norte, hoy se cree extinguida por completo, sin que se haya visto ni sabido de alguna viva desde 1844, cuando se capturaron dos cerca de Islandia. En palabras de Darwin, la muerte de una especie es algo más notable que el fin de una dinastía imperial. "Ningún hecho en la larga historia del mundo es tan alarmante como el exterminio general y repetido de sus habitantes." Nada podemos decir acerca de cómo la gran alca abandonó la vida, mediante cuál de las grandes causas de extinción que actúan hoy de forma lenta pero incesante, como la elevación y el hundimiento de los estratos geológicos, la invasión de otros animales y las perturbaciones climáticas.»

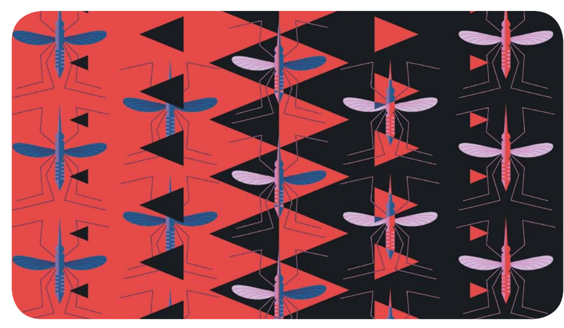


COSMOLOGÍA

Una crisis cósmica

Richard Panek

Dos medidas discrepantes de la velocidad de expansión del universo no pueden ser simultáneamente ciertas. Algo tiene que ceder, pero ¿qué?



BIOTECNOLOGÍA

Riesgos y promesas de la genética dirigida

Megan Scudellari

Cinco cuestiones clave que los investigadores deberían responder antes de desplegar esta técnica en la naturaleza.

MATEMÁTICAS

La hipótesis del continuo

Jean-Paul Delahaye

¿Existe un infinito más grande que el de los números enteros y más pequeño que el de los números reales? Una línea de investigación reciente propone una solución a este enigma centenario.

ECOLOGÍA

¿Qué está matando a las monarcas?

Gabriel Popkin

Todo parecía estar claro: el herbicida Roundup estaba acabando con la mariposa favorita de Norteamérica. Pero nuevos indicios han desatado el debate en torno a otras causas.



INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

DIRECTORA EDITORIAL
Laia Torres Casas
EDICIONES
Anna Ferran Cabeza, Ernesto Lozano Tellechea, Yvonne Buchholz
DIRECTOR DE MÁRQUETIN Y VENTAS
Antoni Jiménez Arnay
DESARROLLO DIGITAL
Marta Pulido Salgado
PRODUCCIÓN
M.ª Cruz Iglesias Capón, Albert Marín Garau
SECRETARÍA
Eva Rodríguez Veiga
ADMINISTRACIÓN
Victoria Andrés Laiglesia
SUSCRIPCIONES
Concepción Orenes Delgado, Olga Blanco Romero

EDITA

Prensa Científica, S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono 934 143 344
precisa@investigacionyciencia.es
www.investigacionyciencia.es

SCIENTIFIC AMERICAN

ACTING EDITOR IN CHIEF Curtis Brainard
PRESIDENT Dean Sanderson
EXECUTIVE VICE PRESIDENT Michael Florek

DISTRIBUCIÓN

para España:
LOGISTA, S. A.
Pol. Ind. Polvoranca - Trigo, 39 - Edificio B
28914 Leganés (Madrid)
Tel. 916 657 158

para los restantes países:
Prensa Científica, S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona

PUBLICIDAD

Prensa Científica, S. A.
Teléfono 934 143 344
publicidad@investigacionyciencia.es

ATENCIÓN AL CLIENTE

Teléfono 935 952 368
contacto@investigacionyciencia.es

Precios de suscripción:

	España	Extranjero
Un año	75,00 €	110,00 €
Dos años	140,00 €	210,00 €

Ejemplares sueltos: 6,90 euros

El precio de los ejemplares atrasados es el mismo que el de los actuales.

COLABORADORES DE ESTE NÚMERO

Asesoramiento y traducción:

José Óscar Hernández Sendín: *Apuntes*; Andrés Martínez: *Apuntes* y *La sorprendente inteligencia de las aves*; Pedro Pacheco: *La increíble diversidad de las aves canoras*; Federico Fernández Gil: *El mapa social del cerebro*; Fabio Teixidó: *La solución del* H_2 y *La primera molécula del universo*; Xavier Roqué: *Imperios y Estados aliados con la ciencia*; Lorenzo Gallego: *Los problemas globales necesitan de las ciencias sociales*; Ángel Garcimartín: *La muchedumbre en ecuaciones*; Ramón Muñoz Tapia: *Las figuras de Lissajous*; J. Vilardell: *Hace...*

ISSN edición impresa 0210-136X Dep. legal: B-38.999-76
ISSN edición electrónica 2385-5665

Imprime Rotimpres - Pla de l'Estany s/n - Pol. Ind. Casa Nova 17181 Aiguaviva (Girona)

Printed in Spain - Impreso en España